

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение электроэнергетики и электротехники

Профиль – Энергосберегающие режимы работы электрических источников питания, комплексов и систем

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы	
Модернизированный электропривод лабораторной установки исследования реологии тяжёлых нефтей	

УДК 553.982.08:542.4:62-83

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Л	Кутеев Владимир Иванович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Данекер В.А.	к.т.н., с.н.с.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко А.А.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД ИШНКБ	Бородин Ю.В.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Отделение электроэнергетики и электротехники (ОЭЭ) инженерной школы энергетики (ИШЭ)	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭЭ ИШЭ	Дементьев Ю.Н.	Ph.D., к.т.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Код результата	Результаты обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
p1	Использовать научные, математические и инженерные знания, с целью разработки и расчета установки по исследованию реологии жидкостей
p2	Использовать познания в сфере современных технологий производства для решения инженерных задач
p3	Устанавливать и разрешать задачи технического анализа, связанные с проектированием установки по исследованию реологии жидкостей
p4	Осуществлять теоретические исследования в области современных установок по исследованию реологии жидкостей
p5	Создавать технологические процессы, проектировать и выбирать подходящие аппараты управления и защиты
p6	Вводить, использовать и обслуживать высокотехнологические линии автоматизированного производства, обеспечивая высокую эффективность, соблюдение правил безопасности труда и защиты окружающей среды
<i>Универсальные компетенции</i>	
p7	Результативно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы, показывать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации
p8	Показывать знания в социальных, этических и культурных аспектах инновационной инженерной деятельности
p9	Самостоятельно обучаться и постоянно повышать квалификацию в течение всего периода деятельности

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение электроэнергетики и электротехники

Профиль – Энергосберегающие режимы работы электрических источников питания, комплексов и систем

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой (руководитель ОЭЭ
ИШЭ)

_____ Дементьев Ю.Н.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Л	Кутеев Владимир Иванович

Тема работы:

Утверждена приказом директора (дата, номер)	Приказ № 795 от 07.02.2018
---	----------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:

15.06.2018

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

1. Номинальное напряжение сети - 220В
2. Частота напряжения сети - 50 Гц
3. Диаметр активатора - 98 мм
4. Характеристики жидкостей:
 - диапазон плотностей 800-2000 кг/м³;
 - диапазон вязкостей - широкий

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор технической литературы, содержащий описание оборудования; 2. Конструирование узла виброобработки, разработка конструкции лабораторной установки; 3. Разработка математической модели виброактиватора; 4. Расчёт режимов работы виброактиватора; 5. Выбор элементов силовой схемы подключения виброактиватора;
<p>Перечень графического материала</p> <p>(с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Общий вид лабораторной установки 2. Чертёж активатора 3. Чертёж листа электромагнита 4. Чертёж пружины

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p>(с указанием разделов)</p>	
Раздел	Консультант
Основное исследование	Данекер Валерий Аркадьевич
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Фигурко Аркадий Альбертович
Социальная ответственность	Бородин Юрий Викторович

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Данекер В.А.	к.т.н., с.н.с.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Л	Кутеев Владимир Иванович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 85 страниц, 29 рисунков, 17 таблиц, 23 источника.

Ключевые слова: ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА, ВСМА, АКТИВАТОР.

Цель работы – проектирование лабораторной установки для изучения влияния технологии ВСМА на реологические свойства различных жидкостей, расчет режимов работы установки, а также разработка рекомендаций по регулированию режимов её работы.

В ходе работы были произведены расчеты параметров электромагнитов, сконструирован блок виброобработки и установка в целом, произведен анализ режимов работы установки на математической модели. Также был выбран преобразователь частоты и способ управления установкой.

Элементы электропривода были выбраны на основании анализа режимов работы установки при изменении различных параметров.

Частотные характеристики лабораторной установки получены с помощью программы MATHCAD 15.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2010.

Оглавление

РЕФЕРАТ	7
ВВЕДЕНИЕ.....	10
1. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ	11
1.1 Обзор существующих методов и технологий изменения свойств жидкостей	12
1.2 Технология ВСМА	16
1.3 Задача проектирования	17
2. КОНСТРУИРОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕОЛОГИИ ЖИДКОСТЕЙ	19
2.1 Состав установки, назначение основных элементов	19
2.2 Единичный рабочий модуль виброобработки	19
2.3 Устройство лабораторной установки.....	26
2.4 Определение обмоточных данных катушек электромагнитного привода.....	27
2.5 Расчет пружинного подвеса.....	29
2.6 Производительности активации (обработки) жидкости	31
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ	33
3.1 Электрическая схема замещения контуров установки	33
3.2 Механический контур лабораторной установки	37
3.3 Уравнения для электрических контуров	38
3.4 Система уравнений схемы замещения установки	41
3.5 Алгоритм расчета системы дифференциальных уравнений.....	42
4. АНАЛИЗ РАБОТЫ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ	44
4.1 Анализ работы лабораторной установки с жидкостью малой вязкости.....	44
4.2 Анализ работы лабораторной установки с жидкостью средней вязкости.....	48
4.3 Анализ работы лабораторной установки с жидкостью высокой вязкости.....	53
4.4 Сравнение эффективности работы лабораторной установки с двумя электромагнитами.....	57

5.	ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА УСТАНОВКИ	63
5.1	Выбор преобразовательного устройства для системы	63
5.2	Выбор аппаратуры управления и защиты	66
5.2.1	Аппаратура управления	66
5.2.2	Аппаратура защиты	66
5.3	Расчет и выбор типа и сечения кабеля сети	67
5.4	Выбор диода	68
6.	ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	69
6.1	SWOT-анализ проекта	69
6.2	Планирование научно-исследовательских работ.....	72
6.2.1	Структура работ в рамках научного исследования	72
6.2.2	Определение трудоемкости выполнения технического проекта..	74
6.2.3	Разработка графика проведения научного исследования	75
6.3	Расчет бюджета для научно-технического исследования.	79
6.3.1	Расчет материальных затрат НТИ	79
6.3.2	Основная заработная плата исполнителей темы	81
6.3.3	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)...	83
6.3.4	Накладные расходы	84
6.3.5	Формирование сметы технического проекта.....	84
6.4	Определение конкурентоспособности проекта	85
7.	ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ... ..	88
7.1	Анализ опасных и вредных факторов	88
7.2	Производственная санитария	90
7.3	Шум и вибрация	92
7.4	Защита окружающей среды	93
7.5	Предотвращение чрезвычайных ситуаций	95
7.6	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	99
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	100
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ... ..	101
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	103

ВВЕДЕНИЕ

Жидкость – одно из состояний веществ, занимающее промежуточное положение между твердым телом, которое отличается полной упорядоченностью в расположении образующих его частиц, и газом, молекулы которого находятся в состоянии беспорядочного движения [23].

Твердые тела при нагревании до определенной температуры плавления расплавляются и переходят в жидкое состояние. В твердых кристаллических телах такой переход происходит скачком. Также, существуют аморфные твердые тела, похожие по своим свойствам на жидкие тела, такие как: стекла, пластмассы, смолы. Они постепенно переходят в жидкое состояние, по мере увеличения температуры – становясь более мягкими и приобретают способность течь. Иногда их называют переохлажденными жидкостями, так как в обычном состоянии данные вещества можно воспринимать как жидкости с большой вязкостью.

Большинство газов при низких температурах переходят в жидкое состояние. Данный переход происходит скачкообразно при температуре конденсации, которая определена для каждого вида газа.

Одна из характерных особенностей жидкости, в отличии от газа - способность сохранять свой объем. Твердое тело наряду с сохранением объема также стремится сохранить свою форму, газы стремятся заполнить весь предоставленный им объем, жидкость приобретает форму сосуда, в котором находится, и обладает высокой текучестью.

1. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

Текучесть — основное свойство жидкостей. При приложении внешней силы к участку жидкости, которая находится в состоянии равновесия, возникает поток частиц жидкости, в сопутствующем направлении с приложенной силой. Жидкости не сохраняют свою форму и поэтому принимают форму сосуда, в котором находятся [1].

Вязкость — это мера сопротивления течению жидкости под действием внешних сил (например, силы тяжести). Вязкость — величина, обратная текучести жидкости, зависит от природы жидкости и уменьшается с увеличением температуры.

Кипение — это процесс интенсивного парообразования, который происходит при нагревании жидкости. При кипении парообразование происходит не только с поверхности, но и внутри неё. Во время кипения происходит поглощение теплоты, которое разрывает связь между частицами вещества.

Испарение — переход вещества из жидкости в газообразную фазу (пар). Испарение происходит только с поверхности жидкости. Оно является результатом того, что молекулы любой жидкости постоянно перемещаются. Причем скорость у молекул разная. Молекулы с достаточно большой скоростью, оказавшись на поверхности, могут преодолеть силу притяжения других молекул и оказаться в воздухе. В результате испарения сама жидкость охлаждается, так как ее покидают наиболее быстрые молекулы. Как известно, температура как раз определяется скоростью движения молекул вещества, то есть их кинетической энергией. Скорость испарения зависит от многих причин. Во-первых, она зависит от температуры жидкости. Чем температура выше, тем испарение быстрее. Это и понятно, так как молекулы двигаются быстрее, а значит, им легче вырваться с поверхности. Скорость испарения зависит от вещества. У одних веществ молекулы притягиваются сильнее, и следовательно, труднее вылетают, а у других — слабее, и следовательно, легче покидают

жидкость. Испарение также зависит от площади поверхности, насыщенности воздуха паром, ветра. Самое главное, что отличает испарение от кипения, это то, что испарение протекает при любой температуре, и оно протекает только с поверхности жидкости.

Конденсация — процесс перехода вещества из газообразного состояния в конденсированное (жидкое или твёрдое) при температурах ниже критической для данного вещества. Возникает, как правило, вследствие охлаждения или сжатия вещества. При конденсации выделяется теплота, причём удельная теплота конденсации равна удельной теплоте испарения. Жидкость, образующаяся при конденсации, называется конденсатом. На смачиваемых поверхностях при конденсации появляется сплошная плёнка конденсата, затрудняющая теплообмен (плёночный режим конденсации); при отсутствии смачивания на поверхности возникают отдельные капли жидкости (капельный режим конденсации).

Смешиваемость — свойство жидкостей растворяться друг в друге, способность образовывать однородные растворы.

1.1 Обзор существующих методов и технологий изменения реологических свойств жидкостей

К основным свойствам жидкостей, которые по требованиям технологических процессов с большой степенью вероятности нуждаются в регулировке применением различных воздействий, можно отнести: плотность, вязкость, агрегатная устойчивость.

Существует ограниченное число технологических процессов, требующих в ходе их осуществления регулировку плотности применяемых в жидких средах в виде чистых жидкостей. При этом следует иметь в виду, что для чистых жидкостей данный параметр можно регулировать в весьма ограниченных пределах. К воздействиям, способным изменять плотность чистых жидкостей, можно отнести тепловое воздействие и воздействие давлением. Проблематичным является тот факт, что указанные воздействия являются

высоко энергозатратными и применяются достаточно редко. Поэтому технологические процессы с применением чистых жидкостей, как правило, не требуют регулировки плотности жидкостей [2].

Достижение требуемой плотности для жидкостей, получаемых смешиванием, является достаточно часто решаемой в практике задачей. Плотность таких жидких сред зависит от соотношений и плотностей отдельных компонентов. Воздействиями, используемыми для реализации таких процессов, являются достаточно прогнозируемые виды такие как: механические, гидравлические, тепловые. Характерным при этом является то, что зачастую в устройствах эти воздействия могут совмещаться, усиливая эффективность. Плотность многокомпонентных жидкостей, получаемых на таких устройствах, может меняться в достаточно широких пределах.

Очень важным параметром для многих технологий с применением жидких сред является получение, поддержание и регулирование вязкости. Имеется ряд отраслей промышленности, для которых проблема регулировки (получения) определённых значений вязкости жидкостей является чуть ли не определяющей. Яркими примерами этого являются нефтегазодобыча, транспортирование нефти и нефтепродуктов, лакокрасочная отрасль и т.п.

Отличительной особенностью характеристик жидкостей, связанных с вязкостью, является то, что в одном случае рассматриваются жидкие среды с практически постоянным значением вязкостью, а в другом, с вязкостью, меняющейся под воздействием различных факторов. В первом случае речь идёт о, так называемых, ньютоновских жидкостях. Вторые - относятся к неньютоновским. Свойства указанных жидких сред иллюстрируются рисунком 1.1. (На рисунке 1.1 приведены зависимости, характеризующие течение указанных жидкостей)

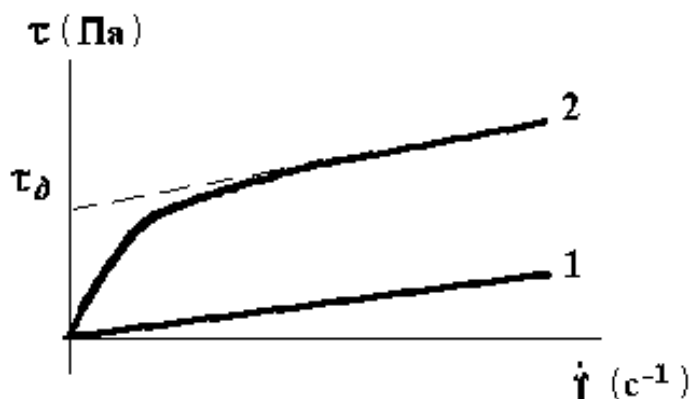


Рисунок 1.1 - Изменение напряжения сдвига и скорости сдвига при течении ньютоновских 1 и неньютоновских 2 жидкостей

Нелинейность зависимости напряжений сдвига τ и скорости сдвига $\dot{\gamma}$ для неньютоновских жидкостей 2 вызывает более высокие абсолютные значения показателей вязкости по сравнению с ньютоновскими 1, что в большей степени проявляется в области малых скоростей. Эффективная вязкость таких жидкостей при малых скоростях во многом определяется величиной τ_d - предельным значением динамического напряжения сдвига. Кроме этого, многие неньютоновские жидкости, в том числе сырая нефть, промывочные и цементные растворы, в определенных условиях способны образовывать структуру и терять, вследствие этого, свою текучесть. Переход таких жидкостей из нетекучего в текучее состояние происходит при достижении определенных значений внешнего усилия.

В нетекучем состоянии силы взаимодействия между этими частицами настолько велики, что может образовываться достаточно прочная и жесткая механическая структура. Свойства таких жидких сред в текучем состоянии во многом определяются размерами локальных структурированных образований. Течение неньютоновских жидкостей удовлетворительно описывается уравнением Шведова-Бингамова, учитывающем два параметра: пластическую вязкость $\mu_{\text{п}}$ и динамическое напряжение сдвига τ_d [2].

$$\mu_{\Sigma} = \mu_n + \frac{\tau_{\partial}}{\gamma} \quad (1.1)$$

где: μ_{Σ} - эффективная вязкость, Па·с;
 μ_n - пластическая вязкость, Па·с;
 τ_{∂} - динамическое напряжение сдвига, Па;
 γ - скорость сдвига, с⁻¹.

Динамическое напряжение сдвига характеризует прочность структуры жидкой среды в условиях непрерывной деформации.

Важным фактором активации жидкости является длительность сохранения ими приобретённых свойств. Свойства большинства неньютоновских жидкостей после активирующих воздействий имеют тенденцию к восстановлению если не до первоначальных значений, то близких к ним. Это явление называется тиксотропией.

Агрегатная устойчивость жидкостей также является важным параметром, определяющим качество и эффективность некоторых технологических процессов. Основными параметрами, определяющими агрегатную устойчивость, являются размеры частиц дисперсной фазы и растворимость одних жидкостей в других. Растворимость жидкостей одной в другой при их несовместимости может быть обеспечена применением дополнительных химических веществ, однако при этом могут быть потеряны изначально необходимые и присущие смешиваемым жидкостям свойства.

Таким образом, следует отметить, что параметры основных свойств жидких сред могут регулироваться практически всей палитрой перечисленных физических воздействий, а их совместное применение, как правило, сопровождается существенным повышением эффективности технологического применения жидкостей. Практически из этого следует, что актуальным является необходимость разработки универсальной технологии и оборудования, использующих в принципе своей работы как можно больше воздействующих факторов. Такие технические решения позволят значительно

повысить эффективность технологических процессов, основу которых составляет применение жидких сред с регулируемыми свойствами.

1.2 Технология ВСМА

Существует метод виброструйной магнитной активации (ВСМА), включающий в себя практически все виды, упомянутых ранее физических воздействий (ссылка на источник). Применение полного комплекса физических воздействий позволяет достигнуть разрушения структуры молекулярных кристаллов и поддерживать этот уровень на протяжении определенного отрезка времени [3].

Принцип ВСМА заключается в создании потока и прохождении его жидкости через зону активации. В основе лежит применение электромагнитного преобразователя (ЭМП) колебательного типа, который работает в резонансном режиме. Зона активации формируется элементами корпуса и рабочим органом, называемым активатором. Использование колебательного движения активатора позволяет получить максимальные амплитудные значения в режиме резонанса.

Основными конструктивными элементами ЭМП являются герметичный корпус, электромагнитный привод, электрическая часть которого размещена в герметичном корпусе, элементы крепления в общей конструкции технологического оборудования. Электромагнитный привод состоит из тягового электромагнита, рабочего органа, совершающего колебательные движения непосредственно в среде жидкости, и упругого подвеса рабочего органа. На рисунке 2.1 представлен общий принцип построения конструкций устройств ВСМА.

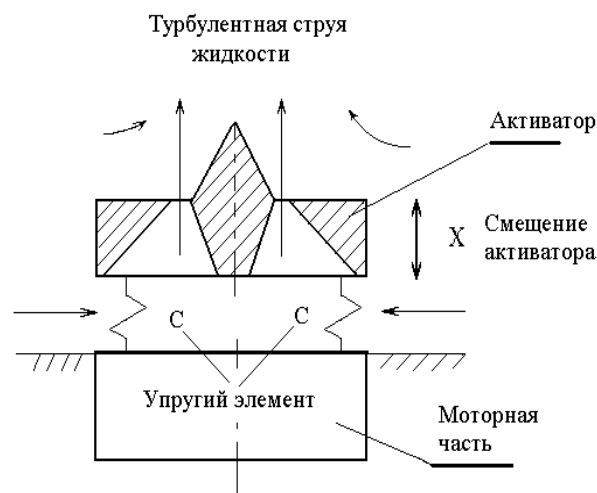


Рисунок 1.2 - Принцип построения устройств ВСМА

В общем случае устройства ВСМА состоят из электромагнитного привода на основе тягового магнита. Так как многие жидкости обладают электропроводящими свойствами, электрические элементы электропривода должны быть изолированы от жидкостей, а именно размещаться в герметичном корпусе. Подобрать необходимые параметры активатора, можно обеспечить работу устройства ВСМА на резонансной частоте. При работе на резонансной частоте достигается максимальная амплитуда колебаний активатора и производительность активации.

Активатор в поперечном сечении перпендикулярном движению может быть выполнен круглой или прямоугольной формы. В теле активатора выполняется отверстие определенной формы, которое формирует затопленные струи жидкостей, это обусловлено разностью гидравлических сопротивлений при движениях активатора к стенке корпуса ЭМП и от неё.

1.3 Задача проектирования

Таким образом, можно сделать вывод, что технология ВСМА является перспективной и с ее помощью можно создать оборудование, которое будет эффективно для обработки различных жидкостей. Особенно это важно для проведения лабораторных исследований особенностей поведения жидкостей

при обработке их технологией ВСМА и определения параметров, характеризующих степень изменения их реологических свойств.

Различные жидкости в силу своих свойств могут по-разному реагировать на физические воздействия технологии ВСМА. Для выявления характеристик, определяющих поведение отдельных жидкостей при воздействии на них технологии ВСМА, требуется проведение лабораторных исследований. Одним из вариантов лабораторной установки для исследования влияния технологии ВСМА на свойства жидкостей был рассмотрен автором ранее в выпускной квалификационной работе (ВКР) бакалаврского уровня. Однако и для данного варианта лабораторной установки существуют некоторые улучшения, позволяющие повысить эффективность исследований.

А именно, на основе выполненной ранее бакалаврской работы, следует изменить подход к устройству и расчету лабораторной установки. Для увеличения возмущающей силы необходимо добавить дополнительный электромагнит в конструкцию установки, что позволит увеличить производительность активации. Также для точности расчетов следует изменить тип движения активатора, в предыдущей работе при моделировании работы установки было принято, что активатор движется линейно. Но фактически активатор совершает движение по окружности, поэтому в расчетах необходимо выбрать угловой тип перемещения активатора, который будет более точно описывать движение активатора, соответственно это позволит получить более точные расчеты.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка модернизированной лабораторной установки исследования влияния технологии ВСМА на различные жидкости.

2. КОНСТРУИРОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕОЛОГИИ ЖИДКОСТЕЙ

2.1 Состав установки, назначение основных элементов

Возбуждение колебаний с помощью электромагнитного вибропривода является наилучшим вариантом для создания вибрационного движения [4].

Напряжение подается по устройству ввода на ЭМП через диод. Диод пропускает одну полуволну напряжения переменного тока, в это время на катушках электромагнитов протекает ток и активатор притягивается под действием электромагнитной силы к магнитопроводам, деформируя пружины. Жидкость, которая находится под активатором, испытывает избыточное давление и под большим давлением выталкивается через круговое отверстие в направлении от корпуса, образуя поток.

Во время второго полупериода, когда диод закрыт, электромагнитная сила равна нулю и активатор, благодаря силе упругости пружины, возвращается в исходное положение. Очередной объем жидкости подтекает под активатор. При непрерывной подаче напряжения активатор будет совершать колебания, и тем самым формировать постоянный поток жидкости, перемешивая и разжижая ее. Для получения максимальной амплитуды колебаний частота переменного тока должна быть равна или близка к собственной частоте колебаний активатора.

2.2 Единичный рабочий модуль виброобработки

Устройства ВСМА имеют модульный вид. Это необходимо для упрощения конструкции устройства, в котором будет возможным применение несколько таких модулей виброобработки.

На рисунке 2.1 изображены основные элементы устройства ВСМА.

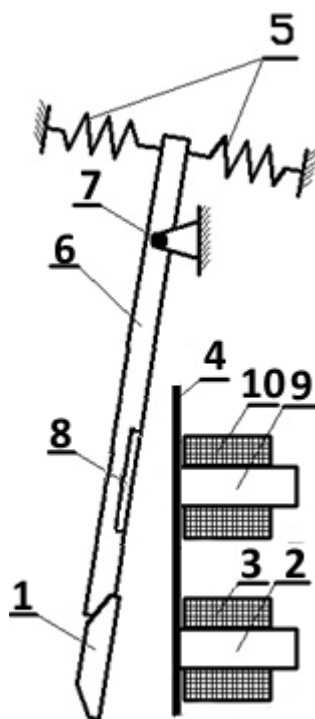


Рисунок 2.1 - Общая схема конструкции модуля устройства ВСМА

Активатор 1 закреплён на длинном плече коромысла 6. На окончании короткого плеча коромысла закреплены упругости 5. Коромысло 6 закреплено на оси 7. Тяговый основной электромагнит, также как и дополнительный, состоят из магнитопровода 2, 9 и обмоток 3, 10. Дополнительная вставка 8 служит для создания силы притяжения дополнительным магнитом. Основной и дополнительный электромагниты отделены от активатора, совершающего колебательные движения в жидкой среде, стенкой корпуса ЭМП 4. Стенка должна быть выполнена из немагнитопроводящего материала. Обмотки электромагнитов подключаются к напряжению переменного тока. При нарастании тока, протекающего по обмотке электромагнита 3, активатор 1 под действием увеличивающихся возмущающих электромагнитных сил между полюсами магнитопроводов и активатором, являющимся якорем электромагнита, двигается к стенке ЭМП. Упругости 5, работающие на сжатие, при этом сжимаются, аккумулируя возвращающую силу. При уменьшении тока в обмотке возмущающая сила снижается и активатор 1 под действием возвращающей силы двигается в обратную сторону в направлении от стенки

ЭМП. При длительной подаче переменного напряжения на обмотку устройства ВСМА активатор будет совершать постоянные колебательные движения.

При каждом движении активатора по направлению к стенке ЭМП объём жидкости, находящейся в зоне активации CDEFGHIK (рисунок 2.2), под избыточным давлением направляется через специальные отверстия в активаторе в сторону от корпуса, образуя затопленные струи [ссылка на бакалаврскую работу].

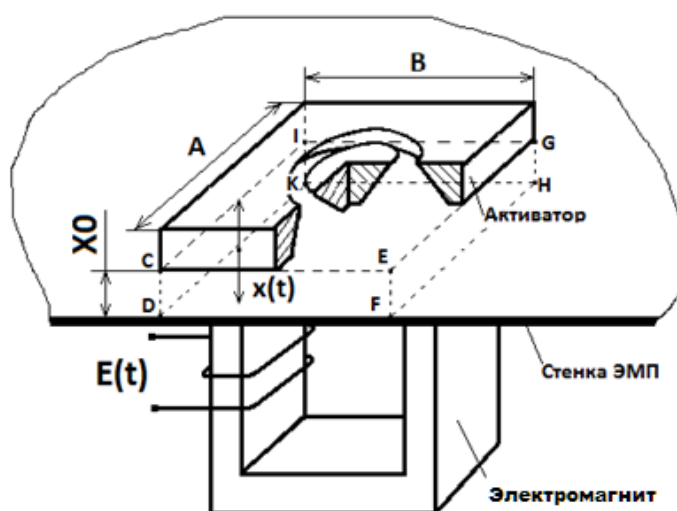


Рисунок 2.2 - Зона активации устройств ВСМА

При обратном направлении движения активатора под ним возникает разрежение и следующая порция жидкости подтекает в зону активации. Ожидать существенных изменений свойств жидкости при однократном прохождении ограниченного объёма через зону активации не приходится. Поэтому ещё одной задачей при регулировании свойств жидкости является организация замкнутого потока, при котором весь объём будет многократно проходить через зону активации.

На рисунке 2.3 изображен обобщённый вид активатора, с помощью которого можно определить его и массу. При определении размеров активатора необходимо учитывать то обстоятельство, что при больших габаритах активатора соответственно растёт и его масса. Для обеспечения резонансного

режима работы устройства ВСМА при большой массе активатора потребуется обеспечить и соответствующее большое значение жёсткости пружинного подвеса. Высокие значений жёсткости могут сказаться на габаритах узла подвеса, что не всегда является приемлемым [2].

Согласно рекомендациям, для устройств ВСМА лабораторного применения активатор должен выполняться с диаметром $D1$ (90-100) мм. Угол раствора струеобразующего конуса выбирается в диапазоне от 60 до 70 градусов. Высоту активатора $H2$ рекомендуется выбирать в пределах $(0,19 \div 0,25)$ от величины $D1$. Размер высоты захода жидкости в конусное отверстие $H6$ принимается от 3 до 5 мм.

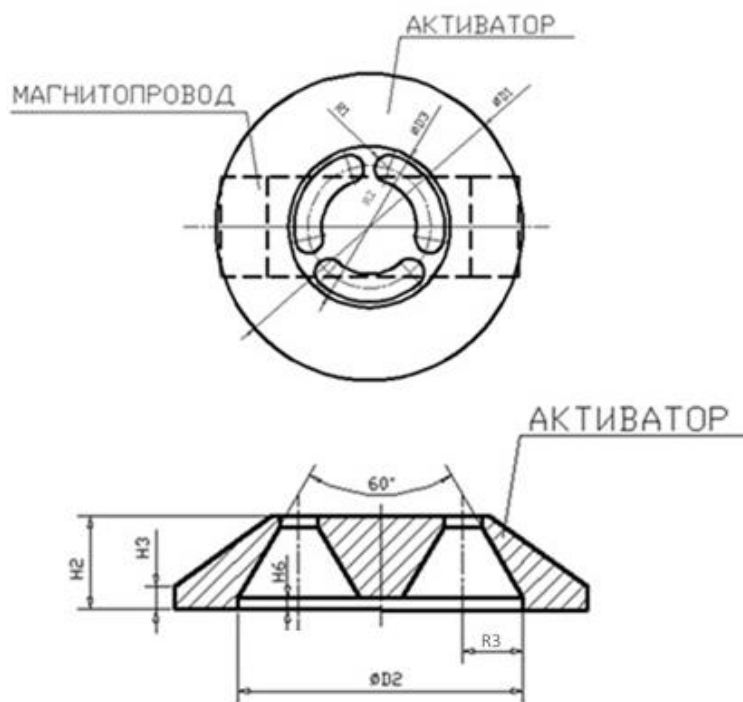


Рисунок 2.3 – Чертеж активатора

Основные размеры активатора модернизированной лабораторной установки с учётом выше приведённых рекомендаций представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Размеры активатора (мм).

H ₂	H ₃	H ₆	R ₁	R ₂	R ₃	D ₁	D ₂	D ₃
25	8	3	4	36	1	98	76	51

Зная основные размеры активатора, можно определить его массу, которую необходимо будет учитывать при моделировании.

Объем активатора без учета полостей:

$$V_{\text{общ}} = \pi \left(\left(\frac{D_1}{2} \right)^2 \cdot H_3 + \frac{1}{3} \cdot (H_2 - H_3) \cdot \left(\left(\frac{D_1}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_1 \cdot D_3}{4} \right) + \left(\frac{D_3}{2} \right)^2 \right) \right) \quad (2.1)$$

$$V_{\text{общ}} = 3.14 \left(\left(\frac{98}{2} \right)^2 \cdot 8 + \frac{1}{3} \cdot (25 - 8) \cdot \left(\left(\frac{98}{2} \right)^2 + \left(\frac{98 \cdot 51}{4} \right) + \left(\frac{51}{2} \right)^2 \right) \right) = 132787,94 \text{ мм}^3$$

Объем пустой нижней полости:

$$V_1 = \pi \left(\left(\frac{D_2}{2} \right)^2 \cdot H_6 \right) \quad (2.2)$$

$$V_1 = 3.14 \cdot \left(\frac{76}{2} \right)^2 \cdot 3 = 13602.48 \text{ мм}^3$$

Объем одного выреза (верхней частью выреза пренебрегаем, т.к. она имеет несущественные размеры):

$$V_2 = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot (H_2 - H_6) \left(\left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(\left(\frac{D_3}{2} - R_1 \right) + 0.42 \cdot 2 \cdot R_2 \right) + \pi \cdot R_1^2 \right) + \sqrt{\left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(\left(\frac{D_3}{2} - R_1 \right) + 0.42 \cdot 2 \cdot R_1 \right) + \pi \cdot R_1^2 \right) + \left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(\left(\frac{D_2}{2} - R_3 \right) + 0.38 \cdot 2 \cdot R_4 \right) + \pi \cdot R_3^2 \right) + \left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(\left(\frac{D_2}{2} - R_3 \right) + 0.38 \cdot 2 \cdot R_4 \right) + \pi \cdot R_3^2 \right)} \right), \quad (2.3)$$

где $R_4 = D_2 - 2 \cdot R_3$

$$V_2 = \frac{1}{3} \cdot 3.14 \cdot (25 - 3) \left(\left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(\left(\frac{51}{2} - 4 \right) + 0.42 \cdot 2 \cdot 36 \right) + 3.14 \cdot 4^2 \right) + \sqrt{\left(\frac{3.14}{2} \cdot \left((25 - 3) \cdot \left(\left(\frac{51}{2} - 4 \right) + 0.42 \cdot 2 \cdot 36 \right) + 3.14 \cdot 51^2 \right) + \left(\frac{3.14}{2} \cdot \left(\left(\frac{76}{2} - 10 \right) + 0.38 \cdot 2 \cdot 20 \right) + 3.14 \cdot 10^2 \right) + \left(\frac{3.14}{2} \cdot \left(\left(\frac{76}{2} - 10 \right) + 0.38 \cdot 2 \cdot 20 \right) + 3.14 \cdot 10^2 \right)} \right) = 12145.41 \text{ мм}^3$$

Объем активатора:

$$V = V_{\text{общ}} - V_1 - 3 \cdot V_2 \quad (2.4)$$

$$V = 132787.94 - 13602.48 - 3 \cdot 12145.41 = 82749.23 \text{ мм}^3 = 0.000083 \text{ м}^3$$

Масса активатора:

$$M = V \cdot \rho, \quad (2.5)$$

где: ρ – плотность стали.

$$M = 0.000083 \cdot 7800 = 0.647 \text{ кг}$$

Для приведённых значений массы активатора для реализации резонансного режима жёсткость пружины рассчитывается

$$C = \omega_0^2 \cdot M, \quad (2.6)$$

где: $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0$ – угловая частота собственных колебаний.

$$C = 364.24^2 \cdot 0.647 = 85837.9 \text{ Н/м (85.8 Н/мм)}$$

Сопротивление движению активатора будет различным в различных жидкостях, поэтому для получения резонансного режима необходимо регулировать частоту питающего напряжения. Регулирование можно осуществить с помощью преобразователя частоты.

Принципиальная схема модуля виброобработки (МВО) с двумя электромагнитами для разрабатываемой установки представлены на рисунке 2.4 и таблице 2.2.

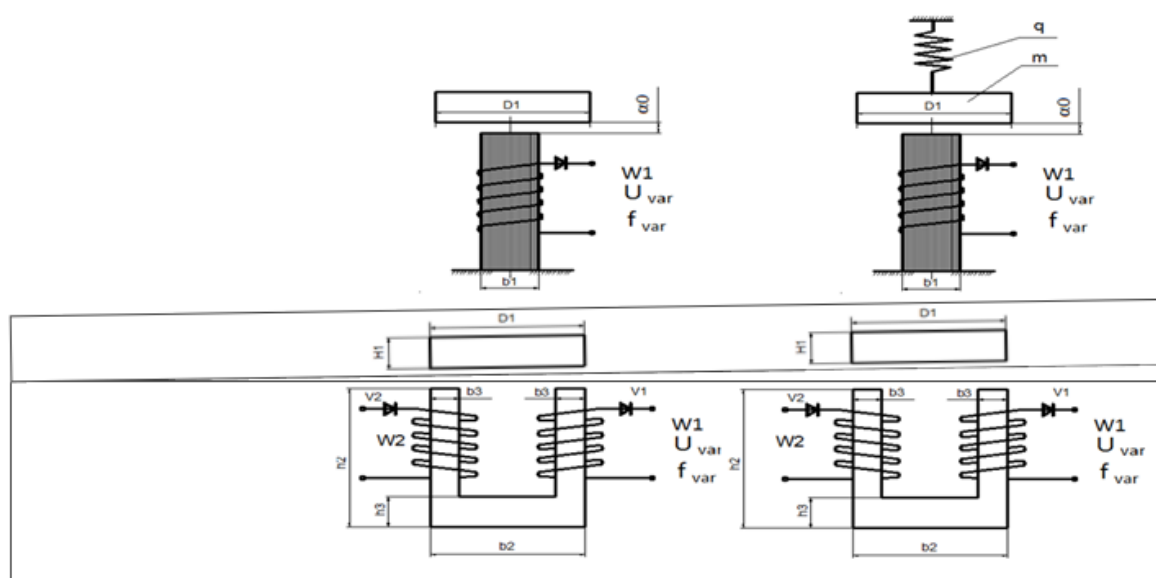


Рисунок 2.4 – Схема блока виброобработки (БВО)

Размеры сердечника и наружный диаметр активатора должны быть взаимосвязанными. Длина ярма сердечника электромагнита В2 для устройств ВСМА соответствует $(0,95 \div 1,0)$ от величины наружного диаметра активатора D_1 . Все остальные размеры сердечника магнитопровода модуля ВСМА можно выбрать, исходя из установленных практикой пропорций многочисленных устройств электромагнитного типа. Ширина полюсного наконечника сердечника В3 составляет $(0,15 \div 0,2)$ от длины ярма В2. Высота ярма сердечника Н3 принимается равной $(1,3 \div 1,5)$ от В2.

Таблица 2.2 – Размеры модуля виброобработки

Параметр	Обозначение	Величина
Диаметр активатора, м	D_1	0,098
Высота активатора, м	H_1	0,025
Высота стержня индуктора магнитопровода, м	H_2	0,071
Длина спинки индуктора магнитопровода, м	B_2	0,098

Ширина индуктора магнитопровода, м	B_1	0,03
Ширина стержня индуктора, м	B_3	0,015
Толщина спинки индуктора магнитопровода, м	H_3	0,02
Величина начального угла	α_0	1.27
Частота собственных колебаний системы, Гц	f_0	58
Резонансная частота в жидкости, Гц	$f_{рж}$	50
Длина рычага до центра активатора, м	$L1_{рыч}$	0.180
Длина рычага до центра дополнительного электромагнита, м	$L2_{рыч}$	0.095

В данном устройстве активатор совершает колебания, а электромагнит связан жестко с корпусом. Якорем электромагнита является активатор.

2.3 Устройство лабораторной установки

На рисунке 2.5 изображен общий вид лабораторной установки. Сама установка закреплена на столе. Для удобства эксплуатации установка имеет съемную кювету, это позволяет повысить оперативность обработки различных жидкостей, т.к. можно поменять одну кювету на другую. Установка закреплена на стойке и может беспрепятственно вращаться вокруг своей оси. Ворот служит для закрепления установки, пружинный узел для регулировки начального угла. Компаунд необходим для теплоотвода и защиты электрической части установки от жидкости. Электромагниты необходимы для создания колебаний.

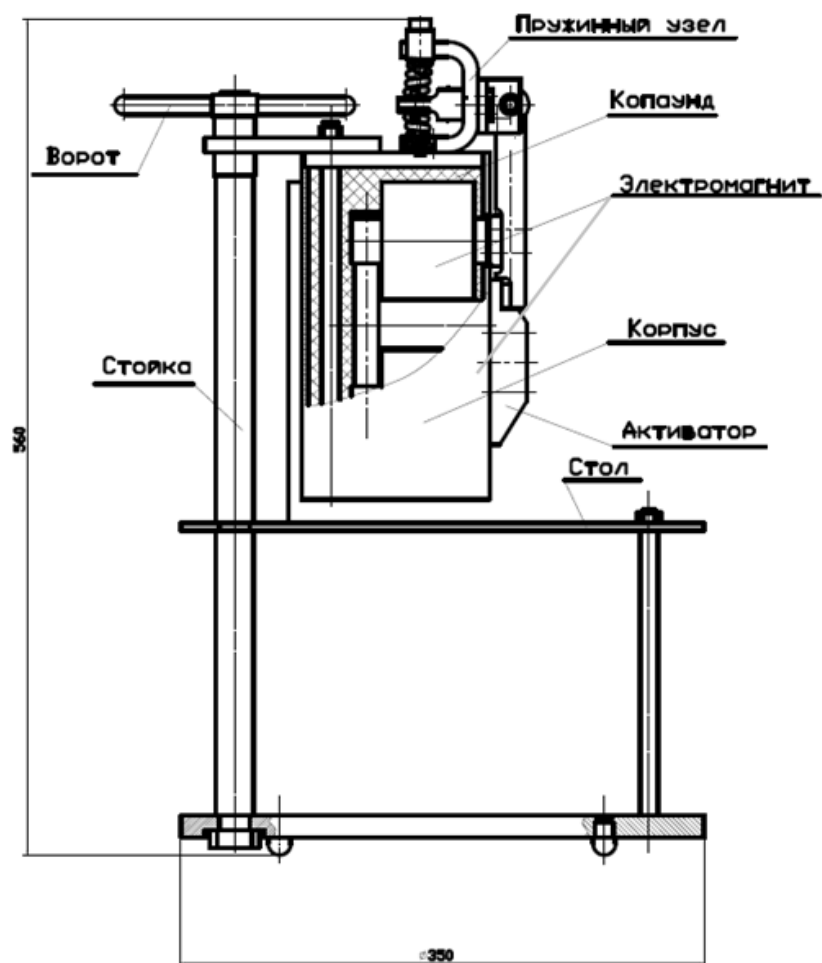


Рисунок 2.5– Общий вид лабораторной установки

Более полный чертеж лабораторной установки представлен в приложении А.

Исходя из бакалаврской работы, можно определить, что объем съемной кюветы, равный четырем литрам является оптимальным, поэтому для данной установки принимаются аналогичные параметры по вместимости кюветы.

2.4 Определение обмоточных данных катушек электромагнитного привода

Исходя из размеров магнитопровода, получаются обмоточные данные, а именно: диаметр обмоточного провода и количество витков. Обмотка

размещается в окне магнитопровода, а полное сечение окна магнитопровода равняется:

$$S_{\text{окна}} = (b_2 - 2 \cdot b_3) \cdot (h_2 - h_3) = (0.08 - 2 \cdot 0.015) \cdot (0.071 - 0.02) = 0.00255 \text{ м}^2. \quad (2.7)$$

Диаметр обмоточного провода может колебаться в районе от 0.2 мм до 2 мм. Выбирается провод эмалированный (обмоточный) с диаметром 1.5 мм [6]. При выборе числа витков обмотки необходимо учитывать коэффициент заполнения межсержневого пространства индуктора витками обмоточного провода при намотке катушки. При автоматизированной намотке коэффициент заполнения проводом составляет $0,45 \div 0,6$. Меньшее значение коэффициента заполнения соответствует проводу с меньшим диаметром. При ручной намотке коэффициент заполнения обмоток проводом выбирается не более 0,43. Возможное количество витков размещенных в окне магнитопровода:

$$W_0 = \frac{S_{\text{окна}}}{\pi \cdot R^2} \cdot k_3 = \frac{0.00255}{3.14 \cdot 0.000575^2} \cdot 0.43 = 1056, \quad (2.8)$$

где: W_0 – количество витков обмотки;

R – радиус обмоточного провода, м;

k_3 – коэффициент заполнения.

Рекомендуется выполнять две обмотки, из-за технологических соображений, следует количество витков одной обмотки будет равно $W=530$.

При расчете активного сопротивления катушек для начала находится средняя длина витка катушки:

$$l_{\text{ср}} = \frac{2(B_1 + B_3 + 4 \cdot B) + 2(B_1 + B_3)}{2}, \text{ где } B \text{ является толщиной катушки.} \quad (2.9)$$

$$B = \frac{B_2 - 2 \cdot B_3 - 0.002}{2} = \frac{0.08 - 2 \cdot 0.015 - 0.002}{2} = 0.024 \text{ м} \quad (2.10)$$

$$l_{cp} = \frac{2(0.03 + 0.015 + 4 \cdot 0.024) + 2(0.03 + 0.015)}{2} = 0.186 \text{ м.}$$

Находится электрическое сопротивление катушки:

$$R_{k0} = \rho \frac{l_{cp} \cdot W}{S}, \quad (2.11)$$

где: ρ - удельное сопротивление меди, $\rho = 0.0175 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$;

S – площадь сечения обмоточного провода, $S = 1.03 \text{ мм}^2$.

$$R_{k0} = 0.0175 \frac{0.186 \cdot 530}{1.03} = 1.7 \text{ Ом.} - \text{при нормальной температуре } 40 \text{ С.}$$

В ходе работы обмотка будет нагреваться, максимальная температура T_{max} нагрева выбранного типа проволоки 130 С. Сопротивление катушки в нагретом состоянии будет равно:

$$R_k = R_{k0} \cdot (1 + a \cdot (T_{max} - T_{nom})) = 1.7 \cdot (1 + 0.004 \cdot (130 - 40)) = 2.31 \text{ Ом} \quad (2.12)$$

Где: a - температурный коэффициент удельного сопротивления для меди

2.5 Расчет пружинного подвеса

Исходя из расчетов, приведенных в формуле 2.6, жесткость выбираемой пружины должна быть не менее $C = 85837.9 \text{ Н/м}$. Чертеж пружины изображен на рисунке 2.6.

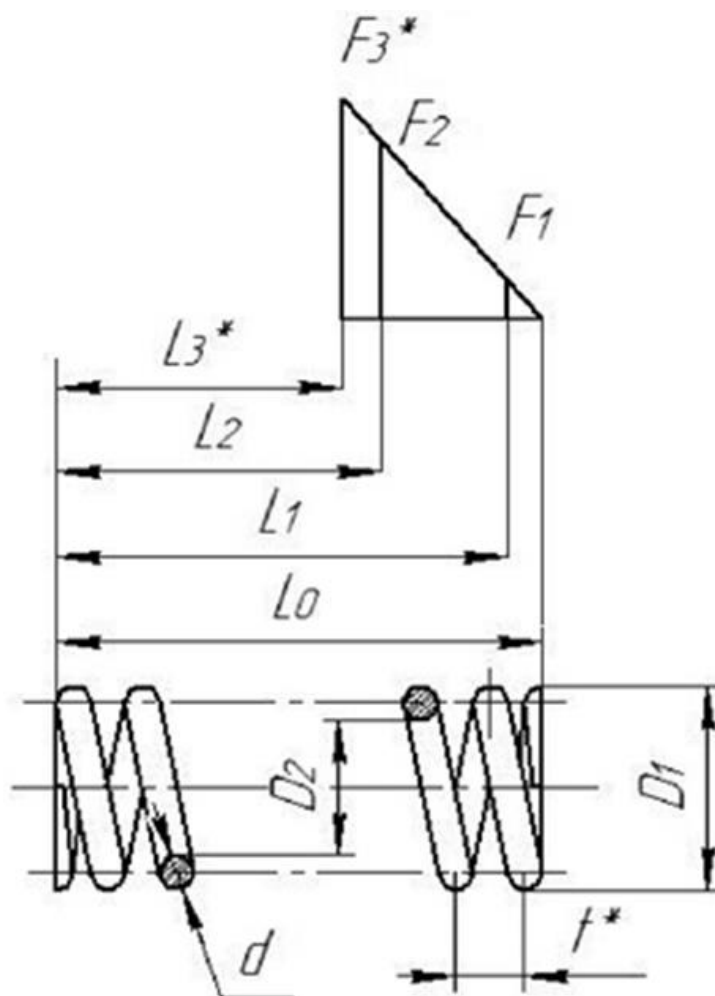


Рисунок 2.6 – Эскизный чертеж пружины

Полученные параметры пружины представлены в таблице 2.3. Данные параметры были получены при помощи online расчета пружин [5].

В ходе выбора пружины, получили параметры, представленные в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Параметры пружины

Материал изготовления	Проволока по ГОСТ 9389
Диаметр проволоки d	0,005 м
Наружный диаметр D_1	0,029 м
Длина пружины без нагрузки L_0	0,030 м
Рабочее число витков n	0,05
Контрольная (предварительная) длина L_1	0,028 м

Контрольная (рабочая) длина L2	0,026 м
Внутренний диаметр D2	0,019 м
Длина при соприкосновении витков L3	0,0325 м
Предварительная нагрузка F1	177.41 Н
Рабочая нагрузка F2	354.82 Н
Максимальная нагрузка F3	221.76 Н
Жёсткость пружины C	88.7 Н/мм
Шаг t	4.5 мм

2.6 Производительности активации (обработки) жидкости

Расход жидкости единичного МВО определяется как:

$$Q=2 \cdot S_{\text{захв}} \cdot L1 \cdot \sin(\alpha 0) \cdot f, \quad (2.13)$$

где: $S_{\text{захв}}$ – площадь захвата, являющаяся частью площади основания активатора;

$L1$ – длина рычага до центра активатора;

$\alpha 0$ – начальный угол поворота коромысла;

f – частота колебаний активатора.

$S_{\text{захв}}$ - площадь захвата рассчитывается по формуле

$$S_{\text{захв}} = k \cdot S_{\text{осн}}, \quad (2.14)$$

где: $S_{\text{осн}}$ – площадь основания активатора;

k – коэффициент захвата.

Для активатора круглой формы коэффициент захвата принимается равным $k=1,0$.

Механическое сопротивление R_{m0} для вязких жидкостей не менее 80 кг/с.

Коэффициент формы активатора λ_{ϕ} необходим для учета влияния турбулентности течения жидкости вблизи активатора, совершающего колебания. Коэффициент для круглой форму активатора имеет значение $\lambda_{\phi}=1,3$. Отмеченные закономерности изменений сопротивления имеют вид:

$$R_m(v) = R_{m0} \cdot \lambda_\phi \cdot e^{\frac{v}{V}}, \quad (2.15)$$

где: v – скорость колебаний активатора в жидкости;

R_{m0} – сопротивление движению активатора;

λ_ϕ – коэффициент формы активатора;

V – скорость активатора, при которой проявляется влияние турбулентности.

Объем активации жидкости зависит от формы активатора, производится расчет для активатора круглой формы.

Площадь захвата для круглой формы $S_{захв}$ рассчитывается по формуле

$$S_{захв} = k \cdot S_{осн} = 1 \cdot 0.0075 = 0.0075 \text{ м}^2 \quad (2.16)$$

$$\text{где: } S_{осн} = \pi \cdot r_{экр}^2 = 3.14 \cdot 0.049^2 = 0.0075 \text{ м}^2 \quad (2.17)$$

площадь основания формы круглого активатора.

$r_{экр} = 0.049 \text{ м}$ - радиус активатора.

Объем расходуемой жидкости, который формируется затопленными струями активатора, при максимальной амплитуде колебаний и начальном угле $\alpha\theta = 1.27$ между стенкой ЭМП и активатором можно определить как:

$$Q_{Nx} = 0.004 \cdot \frac{0.004}{0.004} \cdot 0.0075 \cdot 50 \cdot 3600 = 5.4 \text{ м}^3/\text{час} \quad (2.18)$$

Производительность обработки жидкостей зависит от количества циклов обработки порций жидкости, которые находятся в зоне активации. Задается количество циклов равное $Z=20$, следует производительность устройств активации будет равна:

$$S_{акт} = \frac{Q_x}{Z} = \frac{5.4}{20} = 0.27 \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.19)$$

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ

3.1 Электрическая схема замещения контуров установки

Электрическая схема состоит из двух частей, каждая из которых представляет собой главный и четыре короткозамкнутых (КЗ) контура. Для первой части: основной электрический контур включает в себя электромагнит (индуктивности $L11$ и $L12$, активные сопротивления катушек $R11$ и $R2$, и диод VD). $M1$ – взаимная индуктивность между основными обмотками, $M11_{кз}$, $M12_{кз}$ – взаимная индуктивность между короткозамкнутыми контурами стенки корпуса модуля ВСМА и основными обмотками. $L1_{кз}$, $L2_{кз}$, $R1_{кз}$, $R2_{кз}$ – индуктивности и активные сопротивления короткозамкнутых контуров, образованных стенкой корпуса модуля ВСМА. $L3_{кз}$, $L4_{кз}$, $R3_{кз}$, $R4_{кз}$ – индуктивности и активные сопротивления короткозамкнутых контуров, образованных массивным активатором. $M11_{кз}$, $M12_{кз}$ – взаимная индуктивность между короткозамкнутыми контурами массивного активатора и основными обмотками; $M113$, $M124$ – взаимная индуктивность между короткозамкнутыми контурами стенки корпуса и массивного активатора модуля ВСМА. В силу симметричности схемы замещения можно ввести некоторые эквивалентные параметры:

$$\begin{aligned} R11 = R12 = R1; \quad L11 = L12 = L1; \quad M111_{кз} = M122_{кз} = M1_{кз}; \\ R11_{кз} = R12_{кз} = R1_{кз1}; \quad R13_{кз} = R14_{кз} = R1_{кз2}; \\ L11_{кз} = L12_{кз} = L1_{кз1}; \quad L13_{кз} = L14_{кз} = L1_{кз2}; \quad M113 = M124 = M12_{кз}; \\ M113_{кз} = M124_{кз} = M1_{кз} \end{aligned}$$

Для второй части все аналогично, все параметры представлены выше будут с индексом «2», получаем следующие эквивалентные параметры:

$$\begin{aligned} R21 = R22 = R2; \quad L21 = L22 = L2; \quad M211_{кз} = M222_{кз} = M2_{кз}; \\ R21_{кз} = R22_{кз} = R2_{кз1}; \quad R23_{кз} = R24_{кз} = R2_{кз2}; \\ L21_{кз} = L22_{кз} = L2_{кз1}; \quad L23_{кз} = L24_{кз} = L2_{кз2}; \quad M213 = M224 = M22_{кз}; \\ M213_{кз} = M224_{кз} = M2_{кз} \end{aligned}$$

Расчетная схема замещения электрической части ЭМП представлена на рисунке 3.1.

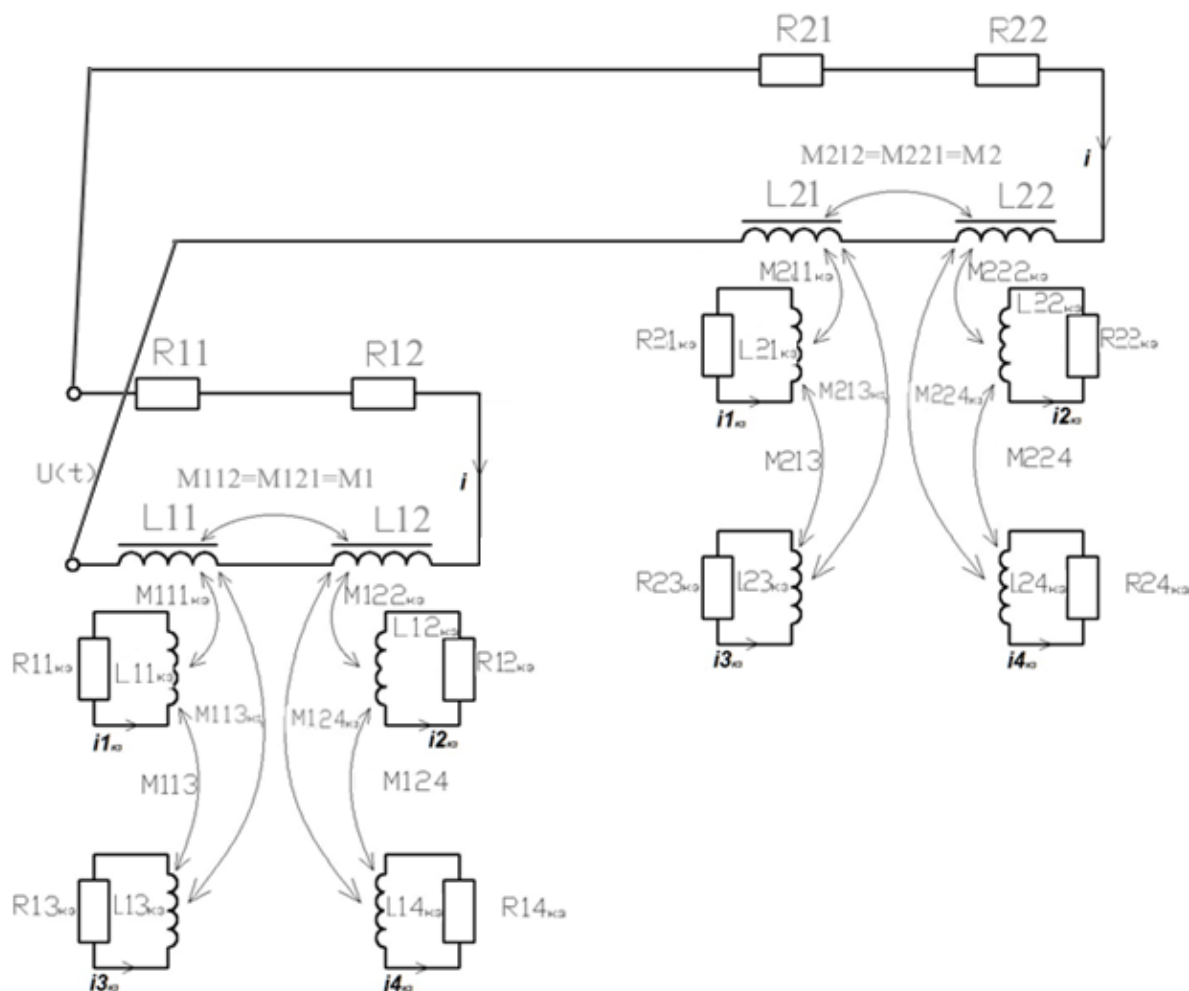


Рисунок 3.1 – Схема замещения электрической части установки

Уравнение равновесия напряжений для основного контура выглядит следующим образом:

$$U_m \sin(\omega t) = i \cdot (R1 + R2) + \frac{d\Sigma\Psi_i}{dt}, \quad (3.1)$$

где: i – ток в основной цепи модуля ВСМА;

$\Sigma\Psi_i$ – суммарное потокосцепление всех контуров основной цепи;

U_m – амплитуда питающего напряжения;

ω – угловая частота питающего напряжения.

Активные сопротивления катушек :

$$R_{кз} = R1_1 = R1_2 = R2_1 = R2_2 = 2.31 \text{ Ом}, \quad (3.2)$$

Суммарное потокосцепление контуров основной цепи модуля ВСМА $\Sigma\Psi_i$ включает в себя потокосцепления каждой из обмоток, которые в свою очередь состоят из собственных потокосцеплений и потокосцеплений, образованных взаимоиנדуктивными связями с имеющимися другими индуктивными элементами.

$$\Sigma\Psi_i = \Sigma\Psi_1 + \Sigma\Psi_2 \quad (3.3)$$

Находятся значения индуктивностей катушек для основного электромагнита, взаимодействующего с активатором:

$$\begin{aligned} L1_1 = L1_2 = L1_k &= \frac{\mu_{ст.} \cdot \mu_0 \cdot S \cdot W^2}{l + \delta_{1\Sigma} \cdot \frac{\mu_{ст}}{\sigma}} = \\ &= 1 \cdot \frac{5000 \cdot 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 450 \cdot 10^{-6} \cdot 1060^2}{0,187 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{5000}{1,5}} = 0.0048 \text{ Гн}, \end{aligned} \quad (3.4)$$

где: $W=1060$ – число витков катушки;

$l=0,187$ м - длина средней линии магнитопровода;

$S=30 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 450 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ – площадь поперечного сечения сердечника;

$\delta_{1\Sigma} = L1 \cdot \sin(\alpha 0) + 1 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м} + 1 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - величина воздушного зазора;

$\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$ – магнитная проницаемость вакуума;

$\mu_{ст} \approx 350$ – относительная магнитная проницаемость стали;

$\sigma = 1,5$ - коэффициент рассеивания;

Вычисляются значения индуктивностей для дополнительного электромагнита, по аналогии с основным электромагнитом:

$$\begin{aligned} L2_1 = L2_2 = L2_k &= k \cdot \frac{\mu_{ст.} \cdot \mu_0 \cdot S \cdot W^2}{l + \delta_{2\Sigma} \cdot \frac{\mu_{ст}}{\sigma}} = \\ &= 1 \cdot \frac{350 \cdot 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 450 \cdot 10^{-6} \cdot 1060^2}{0,187 + 3.1 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{350}{1,5}} = 0.13 \text{ Гн}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

где: $\delta_{2\Sigma} = L2 \cdot \sin(\alpha 0) + 1 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 2.1 \cdot 10^{-3} \text{ м} + 1 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 3.1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - величина воздушного зазора;

Выражения для определения расчётных значений взаимоиндуктивностей обмоток равно:

$$M1_{12} = \frac{W^2 \cdot \mu_{\text{ст.}} \cdot \mu_0 \cdot S}{\delta_{\Sigma} \cdot \mu_{\text{ст}} + l} = 1 \cdot \frac{350 \cdot 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 450 \cdot 10^{-6} \cdot 1060^2}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 350 + 0,187} = 0.00014 \text{ Гн} \quad (3.6)$$

$$M2_{12} = \frac{W^2 \cdot \mu_{\text{ст.}} \cdot \mu_0 \cdot S}{\delta_{\Sigma 2} \cdot \mu_{\text{ст}} + l} = 1 \cdot \frac{350 \cdot 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 450 \cdot 10^{-6} \cdot 1060^2}{3.1 \cdot 10^{-3} \cdot 350 + 0,187} = 0.00022 \text{ Гн} \quad (3.7)$$

Уравнение равновесия напряжений для короткозамкнутого контура (к.з.к.) модуля ВСМА выглядит следующим образом:

$$0 = i_{\text{кз}} \cdot R_{\text{кз}} + \frac{d\Sigma\Psi_{\text{кз}}}{dt}, \quad (3.8)$$

где: $I_{\text{кз}}$ - ток в к.з.к.;

$R_{\text{кз}}$ – активное сопротивление короткозамкнутого контура;

$\Sigma\Psi_{\text{кз}}$ – суммарное потокосцепление короткозамкнутого контура

Активное сопротивление короткозамкнутого контура модуля ВСМА рассчитывается по формуле:

$$R1_{\text{кз}} = R2_{\text{кз}} = \rho_{\text{кз}} \cdot \frac{l_{\text{кз}}}{S_{\text{кз}}} \cdot (1 + a \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{nom}})) = 0.002 \text{ Ом}, \quad (3.9)$$

где $\rho_{\text{кз}} = 0.047 \text{ Ом}^{-1}$ – проводимость короткозамкнутого витка,

$l_{\text{кз}} = 0.086 \text{ м}$ – длина короткозамкнутого витка,

$S_{\text{кз}} = 20 \text{ мм}^2$ – сечение короткозамкнутого витка.

Выражения для определения расчётных значений взаимоиндуктивностей короткозамкнутых витков равны:

$$M1_{\text{кз}} = \frac{W \cdot \mu_0 \cdot S}{\delta_{1\Sigma} \cdot \mu_{\text{ст}} + \frac{l}{0.5}} = 1 \cdot \frac{1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 450 \cdot 10^{-6} \cdot 1060}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 350 + \frac{0,187}{0.5}} = 1.4 \cdot 10^{-4} \text{ Гн} \quad (3.10)$$

$$M2_{\text{кз}} = \frac{W \cdot \mu_0 \cdot S}{\delta_{2\Sigma} \cdot \mu_{\text{ст}} + \frac{l}{0.5}} = 1 \cdot \frac{1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 450 \cdot 10^{-6} \cdot 1060}{3.1 \cdot 10^{-3} \cdot 350 + \frac{0,187}{0.5}} = 2.2 \cdot 10^{-4} \text{ Гн} \quad (3.11)$$

3.2 Механический контур лабораторной установки

Схема замещения механического приведена на Рисунке 3.2, где J – общий момент инерции всех подвижных частей, q – жесткость упругого элемента, M_B – момент силы всех подвижных частей, R – механическое сопротивление.

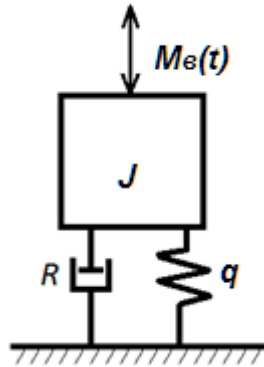


Рисунок 3.2 - Схема замещения механического контура

Масса специальной вставки толщиной 8 мм для дополнительного магнита:

$$M_{став} = (B_2 + 0.01) \cdot (H_3 + 0.015) \cdot 0.008 \text{ м} \cdot \rho = 0.09 \cdot 0.035 \cdot 0.008 \cdot 7800 = 0.19 \text{ кг} \quad (3.12)$$

Общий вид дифференциального уравнения, описывающего колебания, для механической части модуля ВСМА при угловых перемещениях активатора:

$$J \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} + R_{\text{мех}} \frac{d\varphi(t)}{dt} + q\varphi(t) = M_B(t), \text{ где} \quad (3.13)$$

$$M_B(t) = M_{B1}(t) + M_{B2}(t) - \text{общий момент силы подвижных частей} \quad (3.14)$$

$$J = \frac{M_{акт} \cdot L1^2}{2} + \frac{M_{став} \cdot L2^2}{2} = \frac{0.647 \cdot 0.018^2}{2} + \frac{0.25 \cdot 0.0095^2}{2} = 0.000116 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (3.15)$$

момент инерции всех подвижных частей колебательной системы;

$R_{\text{мех}}$ – коэффициент механических потерь на вязкое трение;

q - жёсткость пружинного подвеса;

$M_e(t)$ – момент вращения возмущающей силы;

φ – угол поворота коромысла.

$M_{e1} = M_{акт} \cdot F1$, где $F1$ – сила, создаваемая основным электромагнитом.

$M_{\varepsilon 2} = M_{\text{став}} \cdot F2$, где $F2$ – сила, создаваемая дополнительным электромагнитом.

Значение коэффициента потерь на вязкое трение при колебательном движении активатора на стадии проектирования устройства ВСМА можно определить по выражению

$$R = \sqrt{2 \cdot J \cdot (\omega_{0ж}^2 - \omega_{рж}^2)}, \quad (3.18)$$

где: $\omega_{рж}$ – угловая частота собственных колебаний активатора в жидкости.

$$\omega_{рж} = 2 \cdot \pi \cdot (\omega_{0ж} - \Delta\omega), \quad (3.19)$$

где: $\Delta\omega$ – разница между резонансной и собственной частотами колебаний активатора в жидкости.

Для удобства решения в систему добавляется следующее уравнение:

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = y(t), \text{ тогда} \quad (3.20)$$

$$J \frac{dy(t)}{dt} + R_{\text{мех}} y(t) + qx(t) = M_{B1}(t) + M_{B2}(t) \quad (3.21)$$

3.3 Уравнения для электрических контуров

Уравнение для основного контура определяется по формуле

$$U_m \sin \omega t = i_o \cdot R_k + \frac{d\psi_{\Sigma}}{dt}, \quad (3.22)$$

где: ψ_{Σ} – суммарное потокосцепление катушек $L1, L2$

i_o – ток протекающий в основном контуре;

R_k – Активное сопротивление основного контура.

ψ_{Σ} – суммарное потокосцепление, будет, имеет вид:

$$\psi_{\Sigma} = \psi_1 + \psi_2,$$

Ψ_1 суммарное потокоцепление катушки $L1$ определяется как:

$$\Psi_1 = \Psi_{\text{соб.инд}1} + \Psi_{\text{в.инд}1} + \Psi_{\text{в.инд.К1}}, \quad (3.23)$$

где:

$\Psi_{\text{соб.инд}1} = i_o \cdot L_1$, - собственное потокоцепление катушки $L1$;

$\Psi_{\text{в.инд}1} = i_o \cdot M_{12}$, - потокоцепление катушки $L1$ с катушкой L_2 ;

$\Psi_{\text{в.инд.К}} = i_{\text{кз}} \cdot M_{1\text{кз}1}$ - потокоцепление с короткозамкнутым контуром;

Ψ_2 - суммарное потокоцепление катушки $L2$ определяется как:

$$\Psi_2 = \Psi_{\text{соб.инд}2} + \Psi_{\text{в.инд}2} + \Psi_{\text{в.инд.К2}}, \quad (3.24)$$

где:

$\Psi_{\text{соб.инд}2} = i_o \cdot L_2$, - собственное потокоцепление катушки $L2$;

$\Psi_{\text{в.инд}2} = i_o \cdot M_{12}$, - взаимное потокоцепление катушек L_1, L_2 ;

$\Psi_{\text{в.инд.К}} = i_{\text{кз}} \cdot M_{1\text{кз}2}$, - взаимное потокоцепление катушек с

короткозамкнутым контуром;

Переписывается уравнение 3.18:

$$U_m \sin \omega t = i_o \cdot R_{\kappa} + \frac{d\Psi_1}{dt} + \frac{d\Psi_2}{dt}, \quad (3.25)$$

где: потокоцепление Ψ_1, Ψ_2 будут равны:

$$\frac{d\Psi_1}{dt} = \frac{\Psi_{\text{соб.инд}1}}{dt} + \frac{\Psi_{\text{в.инд}1}}{dt} + \frac{\Psi_{\text{в.инд.К1}}}{dt} = \frac{i_o \cdot L_1}{dt} + \frac{i_o \cdot M_{12}}{dt} + \frac{i_o \cdot M_{1\text{кз}1}}{dt}, \quad (3.26)$$

$$\frac{d\Psi_2}{dt} = \frac{\Psi_{\text{соб.инд}2}}{dt} + \frac{\Psi_{\text{в.инд}2}}{dt} + \frac{\Psi_{\text{в.инд.К2}}}{dt} = \frac{i_o \cdot L_2}{dt} + \frac{i_o \cdot M_{12}}{dt} + \frac{i_o \cdot M_{1\text{кз}2}}{dt}, \quad (3.27)$$

Используя выражение получается общая расчетную формулу:

$$\begin{aligned}
Um \cdot \sin(\omega t) &= i_o \cdot R_{\kappa} + \\
&+ i_o \left(\frac{dL_1}{dt} + \frac{dL_2}{dt} + \frac{dM_{12}}{dt} + \frac{dM_{21}}{dt} + \frac{M_{1\kappa 31}}{dt} + \frac{M_{1\kappa 32}}{dt} \right) + \\
&+ \frac{di_o}{dt} (L_1 + L_2 + M_{12} + M_{21} + M_{1\kappa 31} + M_{1\kappa 32});
\end{aligned} \quad (3.28)$$

Упрощается уравнение заменой дифференциала произведением на суммы двух дифференциалов:

$$\begin{aligned}
Um \cdot \sin(\omega t) &= -i_o \cdot R_{\kappa} - \\
&- i_o \cdot (L_1 + L_2 + M_{12} + M_{21} + M_{\kappa 31-1} + M_{\kappa 32-1} + M_{\kappa 32-2} + M_{\kappa 31-2}) = \\
&= \frac{di_o}{dt} \left(\frac{dL_1}{dt} + \frac{dL_2}{dt} + \frac{dM_{12}}{dt} + \frac{dM_{21}}{dt} + \frac{M_{1\kappa 31}}{dt} + \frac{M_{1\kappa 32}}{dt} \right);
\end{aligned} \quad (3.29)$$

Группируются однородные члены выражения для составления системы уравнений основного контура:

$$\frac{di_o}{dt} = \frac{Um \cdot \sin(\omega t) - 2i_o \cdot R_{\kappa} - i_o \left(\frac{dL_1}{dt} + \frac{dL_2}{dt} + \frac{dM_{12}}{dt} + \frac{dM_{21}}{dt} + \frac{M_{1\kappa 31}}{dt} + \frac{M_{1\kappa 32}}{dt} \right)}{L_1 + L_2 + M_{12}}, \quad (3.30)$$

Уравнение для короткозамкнутого контура:

$$0 = i_{\kappa 3} \cdot R_{\kappa 3} + \frac{d\psi_{\kappa 31}}{dt}, \quad (3.31)$$

Где: $\psi_{\kappa 3}$ - потокосцепление короткозамкнутого контура, представляющий собой суммарный магнитный поток, сцепляющийся со всеми витками катушки индуктивности и взаимноиндуктивности короткозамкнутого контура.

Производятся для короткозамкнутого контура операции преобразования как для основного контура и получается окончательный вид :

$$\frac{i_{\kappa 3}}{dt} = \frac{-i_{\kappa 3} \cdot R_{\kappa 3} - i_{\kappa 3} \left(\frac{L_{\kappa 3}}{dt} + \frac{M_{\kappa 31\kappa 32}}{dt} + \frac{M_{1\kappa 31}}{dt} + \frac{M_{1\kappa 32}}{dt} \right)}{L_{\kappa 3}}. \quad (3.32)$$

Уравнение для дополнительного электромагнита имеет аналогичный вид, по отношению к модулю ВСМА отличается лишь численными значениями составляющих уравнений. Поэтому для упрощения задаются аналогичные имена параметров с индексом 2.

3.4 Система уравнений схемы замещения установки

Для решения системы уравнений, состоящей из уравнений механического и электрических контуров, необходимо преобразовать ее в удобный вид, для решения численными методами.

В результате преобразований уравнений составляется система дифференциальных уравнений, состоящая из уравнений равновесия напряжений основного и короткозамкнутых контуров модуля ВСМА и электромагнита, механического контура, представленного двумя уравнениями. Уравнения в системе должны быть представлены относительно определения неизвестных величин. Неизвестными величинами в системе уравнений являются ток в основной цепи, ток в короткозамкнутом контуре и угол колебаний коромысла активатора. Допущения, которые могут быть использованы при решении системы дифференциальных уравнений, связаны в основном с тем, что при наличии достаточно больших воздушных зазоров, магнитная цепь модуля ВСМА является не насыщенной. Кроме этого взаимоиנדуктивностями короткозамкнутых витков в связи с их малостями можно пренебречь. В общем случае с учётом указанных обстоятельств система дифференциальных уравнений для модуля ВСМА с линейным перемещением активатора имеет вид, представленный в (3.33).

$$\begin{aligned}
F11(t, I1, I1_k, \alpha, y) &:= \frac{E(t) - 2I1 \left(Rk1 + LL1(\alpha, I1) \cdot y + MM1_{12}(\alpha, I1) \cdot y - \frac{M1_{k12}(\alpha, I1)}{L1_{k3}(I1)} - MM1_k(\alpha, I1) \cdot y \right) - 2I1_k \left[MM1_k(\alpha, I1) \cdot y - \frac{M1_{k12}(\alpha, I1) \cdot (R1_{k3} + LL1_k(\alpha, I1) \cdot y)}{L1_{k3}(I1)} \right]}{2 \left(L1_{o6}(\alpha, I1) + M1_{12}(\alpha, I1) - \frac{M1_{k12}(\alpha, I1)^2}{L1_{k3}(I1)} \right)} \\
F21(t, I2, I2_k, \alpha, y) &:= \frac{E(t) - 2I2 \left(Rk1 + LL2(\alpha, I2) \cdot y + MM2_{12}(\alpha, I2) \cdot y - \frac{M2_{k12}(\alpha, I2)}{L2_{k3}(I2)} - MM2_k(\alpha, I2) \cdot y \right) - 2I2_k \left[MM2_k(\alpha, I2) \cdot y - \frac{M2_{k12}(\alpha, I2) \cdot (R2_{k3} + LL2_k(\alpha, I2) \cdot y)}{L2_{k3}(I2)} \right]}{2 \left(L2_{o6}(\alpha, I2) + M2_{12}(\alpha, I2) - \frac{M2_{k12}(\alpha, I2)^2}{L2_{k3}(I2)} \right)} \\
F12(t, I1, I1_k, \alpha, y) &:= \frac{-I1_k \left[(R1_{k3} + LL1_k(\alpha, I1) \cdot y) - \frac{M1_{k12}(\alpha, I1)}{L1_{o6}(\alpha, I1) + M1_{12}(\alpha, I1)} - MM1_k(\alpha, I1) \cdot y \right] - \frac{M1_{k12}(\alpha, I1)}{2(L1_{o6}(\alpha, I1) + M1_{12}(\alpha, I1))} \cdot E(t) - I1 \left[M1_{k12}(\alpha, I1) \cdot y - \frac{M1_{k12}(\alpha, I1)}{L1_{o6}(\alpha, I1) + M1_{12}(\alpha, I1)} \cdot (Rk1 + LL1(\alpha, I1) \cdot y + MM1_{12}(\alpha, I1) \cdot y) \right]}{L1_{k3}(I1) - \frac{M1_{k12}(\alpha, I1)^2}{L1_{o6}(\alpha, I1) + M1_{12}(\alpha, I1)}} \\
F22(t, I2, I2_k, \alpha, y) &:= \frac{-I2_k \left[(R2_{k3} + LL2_k(\alpha, I2) \cdot y) - \frac{M2_{k12}(\alpha, I2)}{L2_{o6}(\alpha, I2) + M2_{12}(\alpha, I2)} - MM2_k(\alpha, I2) \cdot y \right] - \frac{M2_{k12}(\alpha, I2)}{2(L2_{o6}(\alpha, I2) + M2_{12}(\alpha, I2))} \cdot E(t) - I2 \left[M2_{k12}(\alpha, I2) \cdot y - \frac{M2_{k12}(\alpha, I2)}{L2_{o6}(\alpha, I2) + M2_{12}(\alpha, I2)} \cdot (Rk1 + LL2(\alpha, I2) \cdot y + MM2_{12}(\alpha, I2) \cdot y) \right]}{L2_{k3}(I2) - \frac{M2_{k12}(\alpha, I2)^2}{L2_{o6}(\alpha, I2) + M2_{12}(\alpha, I2)}} \\
F3(t, I1, I1_k, I2, I2_k, \alpha, y) &:= \frac{M_{B1}(t, I1, I1_k, \alpha) + M_{B2}(t, I2, I2_k, \alpha) - Rm(t, y) \cdot y - q(\alpha) \cdot \alpha}{Jo_{\text{общ}}} \\
F4(t, I1, I1_k, I2, I2_k, \alpha, y) &:= y
\end{aligned}$$

3.5 Алгоритм расчёта системы дифференциальных уравнений

Система уравнений, приведенная в пункте 3.4, не может быть решена при помощи аналитического метода, поэтому для расчета режимов работы БВО используется метод Рунге-Кутты.

Данный метод обладает большой точностью и удобен для практических вычислений.

Система расчета состоит из итерационного определения шести коэффициентов K, M, S, C, B, P:

$$\begin{aligned}
K(t, I1, I1_k, \alpha, y) &:= \frac{k1(t, I1, I1_k, \alpha, y) + 2 \cdot k2(t, I1, I1_k, \alpha, y) + 2 \cdot k3(t, I1, I1_k, \alpha, y) + k4(t, I1, I1_k, \alpha, y)}{6} \\
M(t, I1, I1_k, \alpha, y) &:= \frac{m1(t, I1, I1_k, \alpha, y) + 2 \cdot m2(t, I1, I1_k, \alpha, y) + 2 \cdot m3(t, I1, I1_k, \alpha, y) + m4(t, I1, I1_k, \alpha, y)}{6} \\
B(t, I2, I2_k, \alpha, y) &:= \frac{b1(t, I2, I2_k, \alpha, y) + 2 \cdot b2(t, I2, I2_k, \alpha, y) + 2 \cdot b3(t, I2, I2_k, \alpha, y) + b4(t, I2, I2_k, \alpha, y)}{6} \\
P(t, I2, I2_k, \alpha, y) &:= \frac{p1(t, I2, I2_k, \alpha, y) + 2 \cdot p2(t, I2, I2_k, \alpha, y) + 2 \cdot p3(t, I2, I2_k, \alpha, y) + p4(t, I2, I2_k, \alpha, y)}{6} \\
S(t, I1, I1_k, I2, I2_k, \alpha, y) &:= \frac{s1(t, I1, I1_k, I2, I2_k, \alpha, y) + 2 \cdot s2(t, I1, I1_k, I2, I2_k, \alpha, y) + 2 \cdot s3(t, I1, I1_k, I2, I2_k, \alpha, y) + s4(t, I1, I1_k, I2, I2_k, \alpha, y)}{6} \\
C(t, I1, I1_k, I2, I2_k, \alpha, y) &:= \frac{c1(t, I1, I1_k, I2, I2_k, \alpha, y) + 2 \cdot c2(t, I1, I1_k, I2, I2_k, \alpha, y) + 2 \cdot c3(t, I1, I1_k, I2, I2_k, \alpha, y) + c4(t, I1, I1_k, I2, I2_k, \alpha, y)}{6}
\end{aligned}$$

Принимается $i1=|_{i+1}$, $i2=|_{i1+1}$, $i1_{кз} =|_{ki+1}$, $i2_{кз} =|_{ki1+1}$. Алгоритм расчетов производится с учетом коэффициентов во времени. Матрица для алгоритма расчета выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} t_0 \\ I1_0 \\ I1_{k0} \\ I2_0 \\ I2_{k0} \\ y_0 \\ \alpha_0 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \Rightarrow \quad \begin{pmatrix} t_{i+1} \\ I1_{i+1} \\ I1_{ki+1} \\ I2_{i+1} \\ I2_{ki+1} \\ y_{i+1} \\ \alpha_{i+1} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} t_i + h \\ \text{if}(I1_i + K(t_i, I1_i, I1_{ki}, \alpha_i, y_i) \geq 0, I1_i + K(t_i, I1_i, I1_{ki}, \alpha_i, y_i), 0) \\ I1_{ki} + M(t_i, I1_i, I1_{ki}, \alpha_i, y_i) \\ \text{if}(I2_i + B(t_i, I2_i, I2_{ki}, \alpha_i, y_i) \geq 0, I2_i + B(t_i, I2_i, I2_{ki}, \alpha_i, y_i), 0) \\ I2_{ki} + P(t_i, I2_i, I2_{ki}, \alpha_i, y_i) \\ y_i + S(t_i, I1_i, I1_{ki}, I2_i, I2_{ki}, \alpha_i, y_i) \\ \text{if}(\alpha_i + C(t_i, I1_i, I1_{ki}, I2_i, I2_{ki}, \alpha_i, y_i) \geq \alpha 0, \alpha 0, \alpha_i + C(t_i, I1_i, I1_{ki}, I2_i, I2_{ki}, \alpha_i, y_i)) \end{pmatrix}$$

В первом ряду матрицы задаётся время расчёта с определённым шагом t_i+h . Во втором, рассчитывается ток I_i в основном контуре, учитывая наличие диод. В третьем ряду учитывается ток I_{ki} в короткозамкнутом витке. В четвертом рассчитывается ток I_i в основном контуре дополнительного электромагнита. В пятом учитывается ток I_{ki} в короткозамкнутом витке дополнительного электромагнита. В шестом ряду учитывает скорость движения активатора, седьмой ряд учитывает смещение активатора относительно средней точки.

Листинг в программе MathCad представлен в приложении Б.

4. АНАЛИЗ РАБОТЫ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Для того, чтобы произвести анализ работы установки, необходимо получить данные о работе с несколькими типами жидкостей.

4.1 Анализ работы лабораторной установки с жидкостью малой вязкости

Проанализируем работу активатора в различных режимах работы при обработке различных жидкостей. В ходе анализа должно соблюдаться постоянство соотношения амплитуды и частоты питающего напряжения $U/f=\text{const}$, установка имеет резонансный принцип работы, поэтому необходимо рассмотреть работу установки при различных частотах питающего напряжения.

Для жидкости малой вязкости принимается значение плотности $\rho_{\text{жм}} = 800 \text{ кг/м}^3$, значение механического сопротивления равным $R_{\text{мм}} = 5 \text{ кг/сек}$.

Масса присоединенной жидкости равна:

$$M_{\text{ж}} = \frac{8}{3} \cdot \rho_{\text{жм}} \cdot R_{\text{акт}}^3 = 0.250 \text{ кг}, \quad (4.1)$$

где $R_{\text{акт}} = 0.049 \text{ м}$ – радиус активатора.

В первую очередь необходимо определить резонансную частоту для работы с маловязкими жидкостями $R_{\text{мех}}=5 \text{ кг/с}$. Для этого в математической модели задаёмся изменяемой частотой питающего напряжения с шагом 5 Гц. Общий диапазон изменения частоты выбираем от 30 до 70 Гц. Для каждого значения частоты рассчитываем амплитуду колебаний активатора, ток в обмотках и производительность активации. Расчётные данные заносим в таблицу 4.1. Из данной таблицы можно увидеть, что резонанс достигается при частоте 60 Гц. Для найденной резонансной частоты необходимо определить точно оптимальный начальный зазор при контроле величины допустимого тока, равного не более 2,45 А. Для этого в математической модели задаёмся

изменяемым начальным углом с шагом 0,003 рад от 0,009 до 0,036 рад. Расчётные данные заносим в таблицу 4.2.

Таблица 4.1 – Определение резонансной частоты при $R_{\text{мех}}=5,0$ кг/с

f, Гц	30	35	40	45	50	55	60	65	70
U, В	132	154	176	198	220	242	264	286	308
Id, А	1,08	1,1	1,03	0,95	0,82	0,95	1,68	1,89	1,85
Ikз, А	123,4	124,2	135,7	144,5	162,6	203,5	278	307,8	317,5
$\Delta\alpha \cdot 10^{-4}$ рад	7,11	7,26	8,02	9,97	11,8	12,92	12,94	12,2	9,89
V, м ³ /час	2,99	3,47	4,72	7,05	8,38	9,23	9,94	10,43	9,33

Таблица 4.2 – Определение оптимального начального угла активатора

α_0 , рад	0,009	0,012	0,015	0,018	0,021	0,024	0,027	0,03	0,033	0,036
U, В	264	264	264	264	264	264	264	264	264	264
Id, А	1,08	1,21	1,49	1,68	1,87	2,04	2,21	2,38	2,55	2,71
Ikз, А	190,1	221,4	250,9	278	305,6	331,2	355,8	379,5	402,5	424,8
$\Delta\alpha \cdot 10^{-4}$ рад	6,65	8,77	10,9	12,94	14,95	16,96	18,9	20,9	22,9	24,8
V, м ³ /час	4,93	6,63	8,28	9,94	11,64	13,32	14,9	16,67	18,34	20,09

Так как ток в основной обмотке не должен превышать 2,42 А, значит наиболее результативным допустимым начальным углом коромысла будет являться угол в 0,03 рад. На рисунках 4.1 и 4.2 представлены частотные характеристики для жидкости малой вязкости в зависимости от частоты питающего напряжения и начального угла поворота коромысла.

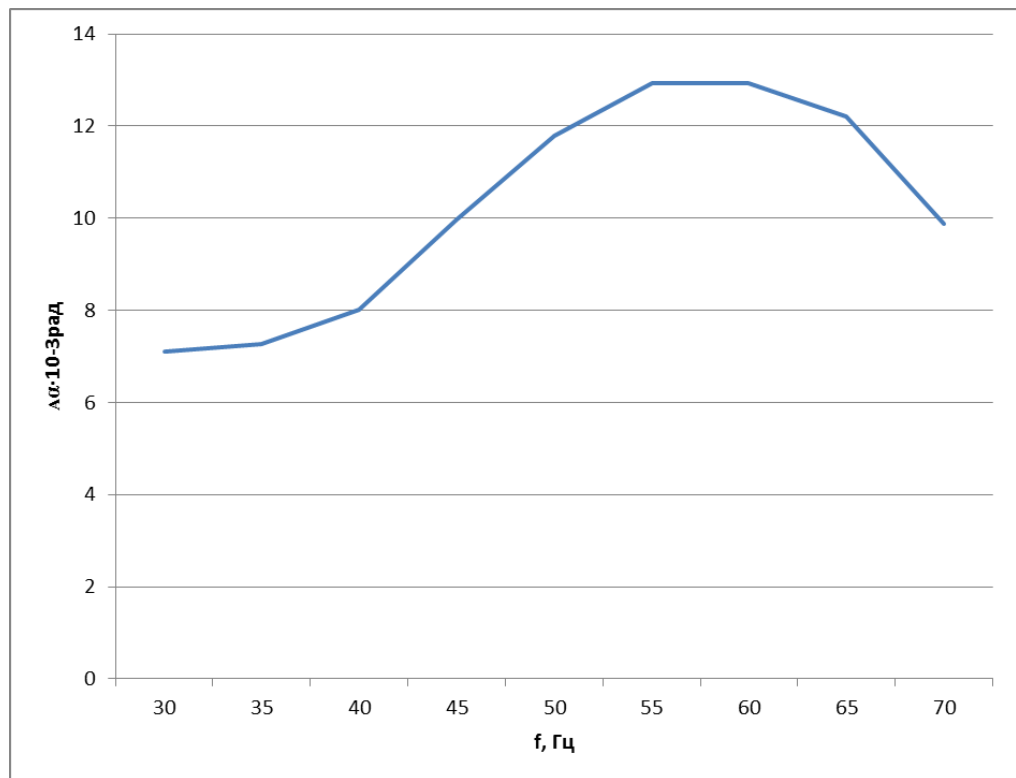


Рисунок 4.1 – Зависимость амплитуды колебаний от частоты питающего напряжения при $\alpha_0=0,018$ рад

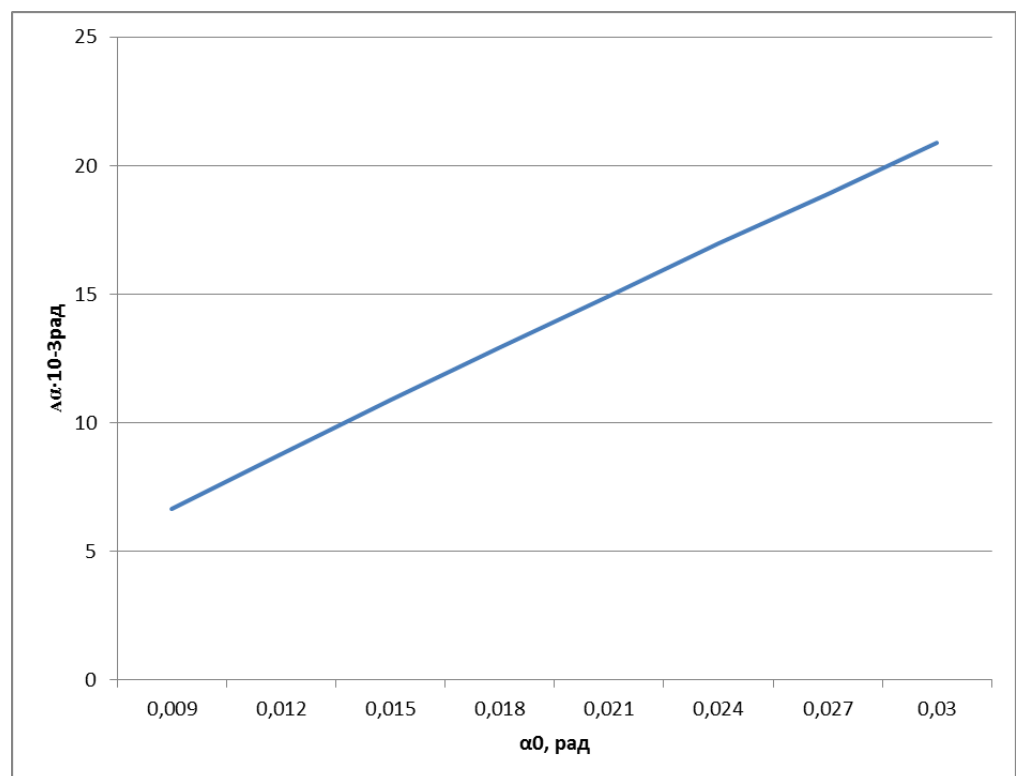


Рисунок 4.2 – Зависимость амплитуды колебаний от начального угла поворота коромысла при $f=60$ Гц

Рассмотрим работу установки в начальном угле поворота коромысла $\alpha_0=0,03$ рад в зависимости от частоты питающего напряжения в диапазоне от 40 до 80 Гц, с шагом 5 Гц. Результаты представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Определение резонансной частоты при $\alpha_0=0,03$ рад

f, Гц	40	45	50	55	60	65	70	75	80
U, В	176	198	220	242	264	286	308	330	352
Id, А	1,62	1,55	1,4	1,18	2,38	2,66	2,4	2,31	2,24
Iкз, А	206,5	222,3	230,5	254,4	379,5	424,5	417,2	421,6	433,24
$\Delta\alpha \cdot 10^{-4}$ рад	7,33	9,17	13,2	20,2	20,9	15,9	9,43	6,74	5,6
V, м ³ /час	1,27	2,86	9,31	15,35	16,67	16,61	7,41	3,71	2,06

На рисунке 4.3 представлена частотная характеристика для жидкости малой вязкости в зависимости от частоты питающего напряжения при $\alpha_0=0,03$ рад.

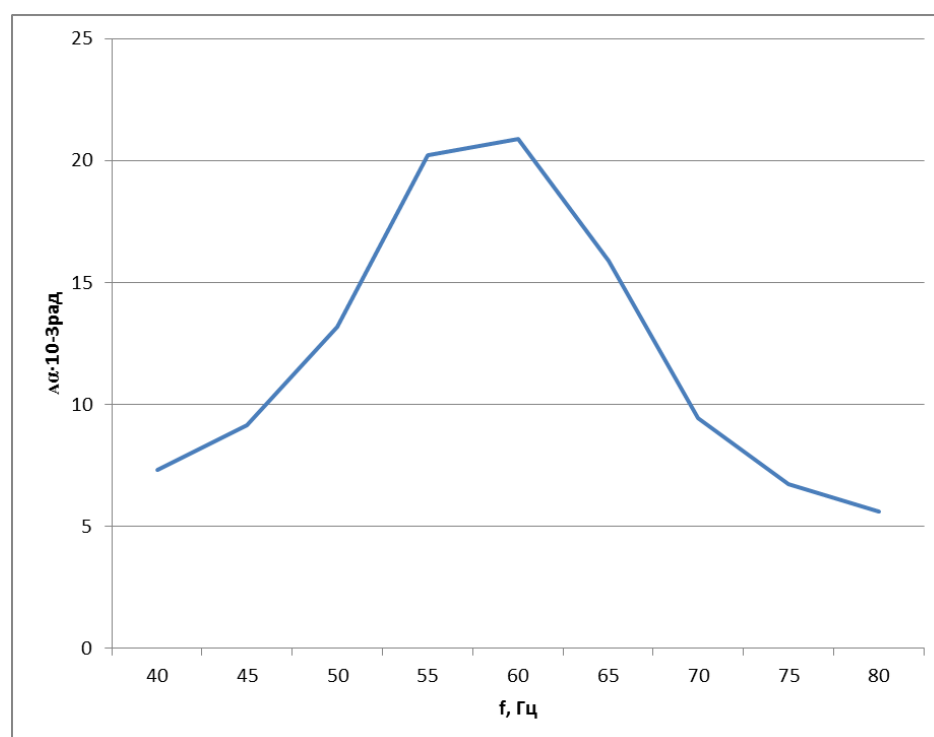


Рисунок 4.3 – Зависимость амплитуды колебаний от частоты питающего напряжения при $\alpha_0=0,03$ рад

На рисунке 4.4 приведены характерные зависимости основных параметров вибратора: угла колебаний, электромагнитная сила притяжения и ток в основной цепи в зависимости от времени при частоте работы активатора $f=60$ Гц и начальном угле поворота коромысла $\alpha_0=0,03$ рад.

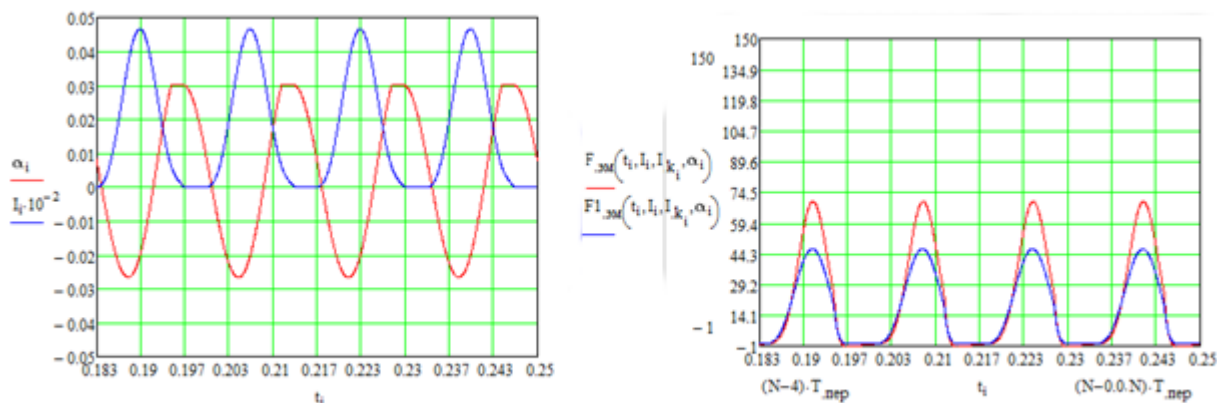


Рисунок 4.4 - Характерные зависимости основных параметров лабораторной установки

Из характеристики видно, что резонанс работы лабораторной установки при обработке ЖС с малой вязкостью и плотностью до 800 кг/м^3 наблюдается на частотах близких к $f=60$ Гц, и оптимальный начальный угол поворота коромысла $\alpha_0=0,03$ рад. Амплитуда колебаний активатора при этом составляет не менее $1,7$ градусов или $5,4$ мм, что обеспечивает достаточно высокое значение производительности активации $16,67 \text{ м}^3/\text{час}$. Так же установлено, что максимальное значение тока установки при этом не превышает допустимое значение и равно $2,38 \text{ А}$.

4.2 Анализ работы лабораторной установки с жидкостью средней вязкости

Для жидкости средней вязкости принимается значение плотности $\rho_{жср} = 1500 \text{ кг/м}^3$, значение механического сопротивления равным $R_{мср} = 15 \text{ кг/сек}$.

Масса присоединенной жидкости средней вязкости будет равна:

$$M_{\text{ж}} = \frac{8}{3} \cdot \rho_{\text{жср}} \cdot R_{\text{акт}}^3 = 0.471 \text{ кг}, \quad (4.2)$$

где $R_{\text{акт}} = 0.049 \text{ м}$ – радиус активатора.

Аналогично с жидкостью малой вязкости, анализируется работа с жидкостями средней вязкости, $R_{\text{мех}}=15 \text{ кг/с}$. Для этого в математической модели задаёмся изменяемой частотой питающего напряжения с шагом 5 Гц. Общий диапазон изменения частоты выбираем от 30 до 70 Гц. Для каждого значения частоты рассчитываем амплитуду колебаний активатора, ток в обмотках и производительность активации. Расчётные данные заносим в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Определение резонансной частоты при $R_{\text{мех}}=15,0 \text{ кг/с}$

f, Гц	30	35	40	45	50	55	60	65	70
U, В	132	154	176	198	220	242	264	286	308
I _d , А	1,11	1,07	1,01	0,96	1,16	1,58	1,78	1,69	1,62
I _{кз} , А	111	122,8	134,5	152,3	193,2	242,7	273,1	278,6	286,1
$\Delta\alpha \cdot 10^{-3}$ рад	6,87	7,41	9	11,1	11,72	11,63	10,5	7,6	6,11
V, м ³ /час	1,77	2,52	4,27	6,71	7,57	8,24	8,73	6,38	3,65

Из данной таблицы можно увидеть, что резонанс в работе установки достигается при частоте 50 Гц. Для найденной резонансной частоты необходимо определить точно оптимальный начальный зазор при контроле величины допустимого тока, равного 2,45 А. Для этого в математической модели задаёмся изменяемым начальным углом с шагом 0,003 рад от 0,009 до 0,033 рад. Расчётные данные заносим в таблицу 4.5, после чего определяется оптимальный начальный угол активатора для максимальной производительности.

Таблица 4.5 – Определение оптимального начального угла активатора

α_0 , рад	0,009	0,012	0,015	0,018	0,021	0,024	0,027	0,03	0,033
U, В	220	220	220	220	220	220	220	220	220
Id, А	0,85	0,95	1,06	1,16	1,28	1,42	1,56	1,69	1,81
Iкз, А	146,3	162,3	177,9	193,2	208,4	222,9	238,6	255,6	272,8
$\Delta\alpha \cdot 10^{-3}$ рад	6,36	8,21	9,99	11,72	13,4	14,9	15,5	15,2	15,04
V, м ³ /час	3,77	5,05	6,31	7,57	8,81	8,91	10,3	6,65	5,1

Наиболее результативным допустимым начальным углом коромысла будет являться угол в 0,027 рад. На рисунках 4.5 и 4.6 представлены частотные характеристики для жидкости средней вязкости в зависимости от частоты питающего напряжения и начального угла поворота коромысла.

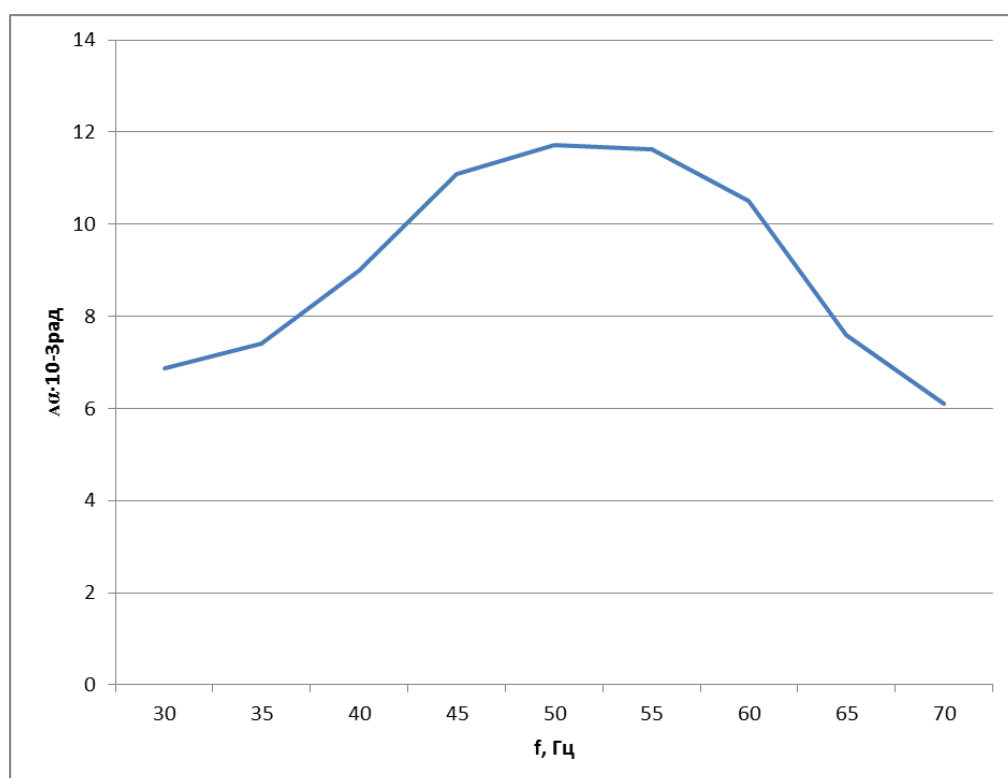


Рисунок 4.5 – зависимость амплитуды колебаний от частоты питающего напряжения при $\alpha_0=0,018$ рад

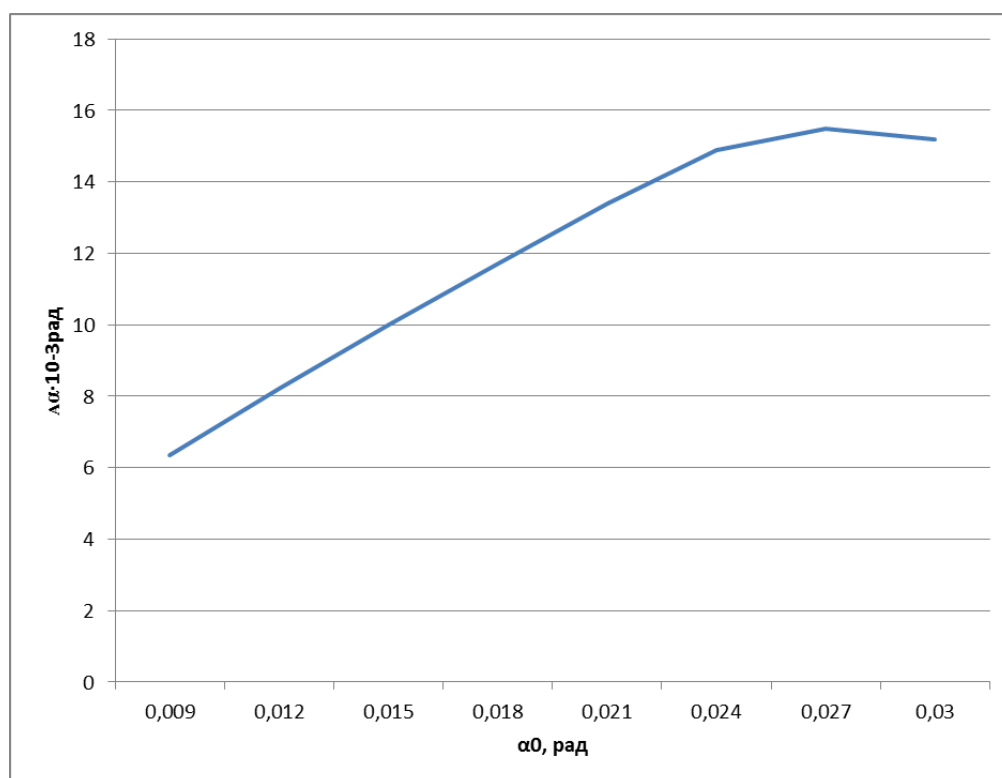


Рисунок 4.6 – зависимость амплитуды колебаний от начального угла поворота коромысла при $f=50$ Гц

Рассмотрим работу установки в начальном угле поворота коромысла $\alpha_0=0,027$ рад в зависимости от частоты питающего напряжения в диапазоне от 30 до 70 Гц, с шагом 5 Гц. Результаты представлены в таблице 4.3.

Таблица 4. Определение резонансной частоты при $\alpha_0=0,027$ рад

f, Гц	30	35	40	45	50	55	60	65	70
U, В	132	154	176	198	220	242	264	286	308
I _d , А	1,52	1,49	1,45	1,39	1,56	2,09	2,18	0,71	2,07
I _{кз} , А	151,4	169,7	186,6	202,5	238,6	308,1	336,4	350,8	364,8
$\Delta\alpha \cdot 10^{-3}$ рад	6,38	6,88	8,42	11,2	15,5	14,8	10,1	7,23	5,79
V, м ³ /час	0,56	0,82	1,34	3,45	10,3	8,48	3,81	2,08	1,21

На рисунке 4.7 представлена частотная характеристика для жидкости средней вязкости в зависимости от частоты питающего напряжения при $\alpha_0=0,027$ рад.

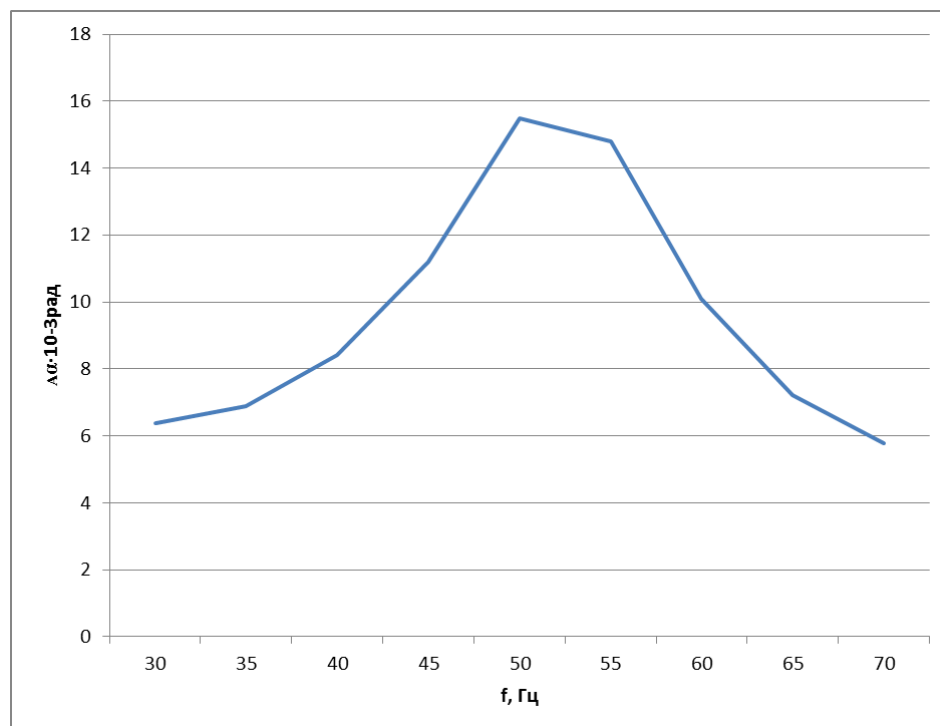


Рисунок 4.7 – зависимость амплитуды колебаний от частоты питающего напряжения при $\alpha_0=0,027$ рад

На рисунке 4.8 приведены характерные зависимости основных параметров вибратора: угла колебаний, электромагнитная сила притяжения и ток в основной цепи в зависимости от времени при частоте работы активатора $f=50$ Гц и начальном угле поворота коромысла $\alpha_0=0,027$ рад.

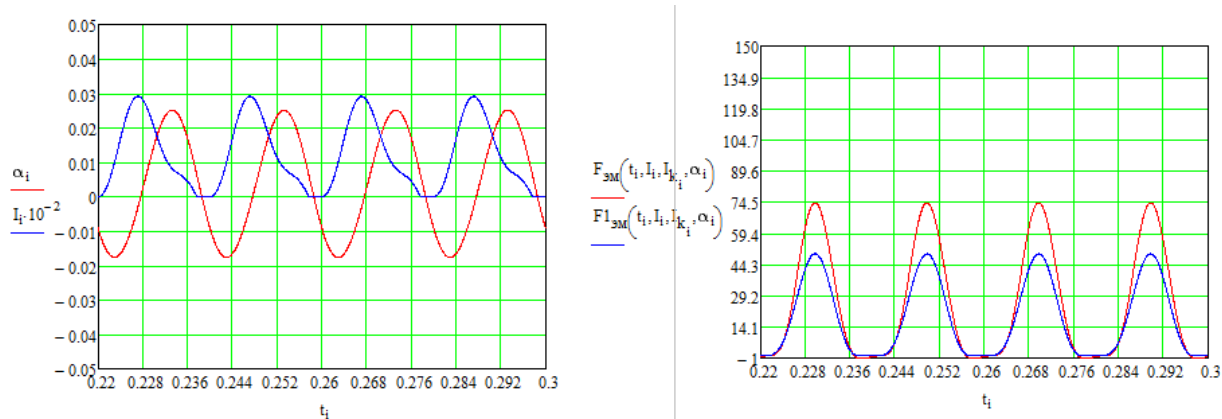


Рисунок 4.8 - Характерные зависимости основных параметров лабораторной установки

Из характеристики видно, что резонанс наблюдается при частоте $f=50$ Гц, и оптимальный начальный угол поворота коромысла $\alpha_0=0,027$ рад. Амплитуда колебаний активатора при этом составляет не менее 1,5 градусов или 4,7 мм, что обеспечивает достаточно высокое значение производительности активации 10,3 м³/час. Так же установлено, что максимальное значение тока установки равно 1,56 А.

4.3 Анализ работы лабораторной установки с жидкостью высокой вязкости

Для жидкости высокой вязкости принимается значение плотности $\rho_{жвыс} = 2000$ кг/м³, значение механического сопротивления равным $R_{мвыс} = 50$ кг/сек.

Масса присоединенной жидкости будет равна:

$$M_{ж} = \frac{8}{3} \cdot \rho_{жвыс} \cdot R_{акт}^3 = 0.626 \text{ кг}, \quad (4.2)$$

где $R_{акт} = 0.049$ м – радиус активатора.

Аналогично с жидкостью малой вязкости, анализируется работа с жидкостями высокой вязкости, $R_{мех}=50$ кг/с. Для этого в математической модели задаёмся изменяемой частотой питающего напряжения с шагом 5 Гц. Общий диапазон изменения частоты выбираем от 30 до 70 Гц. Для каждого значения частоты рассчитываем амплитуду колебаний активатора, ток в обмотках и производительность активации. Расчётные данные заносим в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 – Определение резонансной частоты при $R_{\text{мех}}=50$ кг/с

f, Гц	30	35	40	45	50	55	60	65	70
U, В	132	154	176	198	220	242	264	286	308
Id, А	1,14	1,17	1,22	1,31	1,38	1,45	1,48	1,49	1,49
Ikз, А	112,8	130	149,5	171,9	195,8	218,1	237,3	253,9	268,8
$\Delta\alpha \cdot 10^{-4}$ рад	5,84	6,27	6,62	6,72	6,47	5,98	5,45	5,02	4,71
V, м ³ /час	0,56	0,73	1,05	1,17	1,09	0,85	0,69	0,58	0,47

Из данной таблицы можно увидеть, что резонанс достигается при частоте 45 Гц. Для найденной резонансной частоты необходимо определить точно оптимальный начальный зазор при контроле величины допустимого тока, равного 2,45 А. Для этого в математической модели задаёмся изменяемым начальным углом с шагом 0,003 рад от 0,009 до 0,03 рад. Расчётные данные заносим в таблицу 4.7.

Таблица 4.7 – Определение оптимального начального угла активатора

α_0 , рад	0,009	0,012	0,015	0,018	0,021	0,024	0,027	0,03
U, В	198	198	198	198	198	198	198	198
Id, А	0,84	1	1,15	1,31	1,44	1,58	1,71	1,85
Ikз, А	122,4	136,2	153,6	171,9	190,2	208,5	226,5	244,2
$\Delta\alpha \cdot 10^{-4}$ рад	5,39	6,75	6,86	6,72	6,58	6,45	6,32	6,19
V, м ³ /час	2,06	2,65	3,45	1,17	0,75	0,5	0,36	0,26

Наиболее результативным допустимым начальным углом коромысла будет являться угол в 0,015 рад. На рисунках 4.9 и 4.10 представлены частотные характеристики для жидкости малой вязкости в зависимости от частоты питающего напряжения и начального угла поворота коромысла.

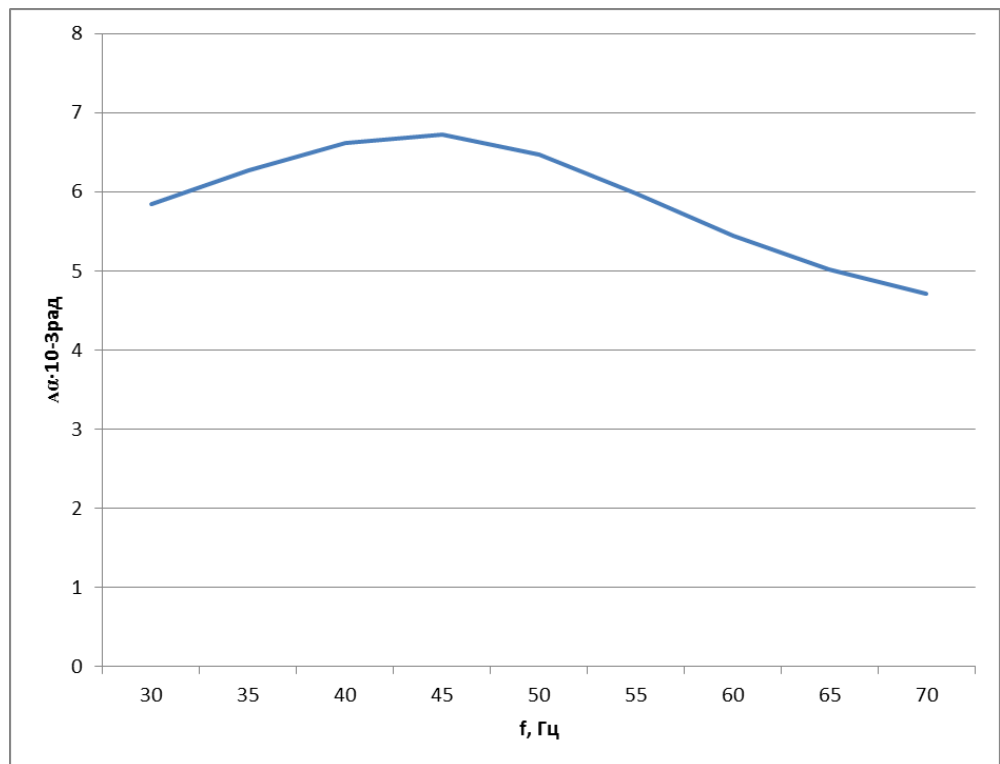


Рисунок 4.9 – зависимость амплитуды колебаний от частоты питающего напряжения при $\alpha_0=0,018$ рад

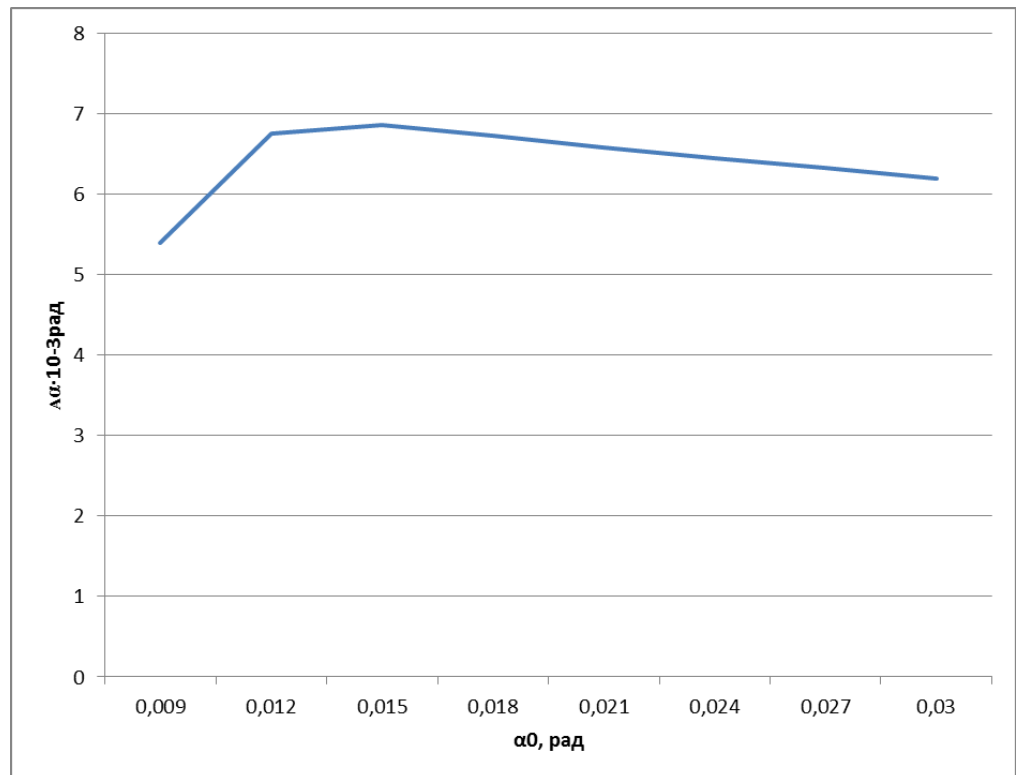


Рисунок 4.10 – зависимость амплитуды колебаний от начального угла поворота коромысла при $f=45$ Гц

Рассмотрим работу установки в начальном угле поворота коромысла $\alpha_0=0,015$ рад в зависимости от частоты питающего напряжения в диапазоне от 25 до 65 Гц, с шагом 5 Гц. Результаты представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Определение резонансной частоты при $\alpha_0=0,015$ рад

f, Гц	25	30	35	40	45	50	55	60	65
U, В	110	132	154	176	198	220	242	264	286
I _d , А	0,99	1	1,03	1,07	1,15	1,24	1,3	1,33	1,34
I _{кз} , А	85,1	99,3	114,7	132,6	153,6	175,7	196,3	213,4	228,1
$\Delta\alpha \cdot 10^{-3}$ рад	5,62	6,02	6,43	6,77	6,86	6,59	6,09	5,56	5,12
V, м ³ /час	0,69	1	1,31	1,77	3,45	1,89	1,47	1,18	1

На рисунке 4.11 представлена частотная характеристика для жидкости высокой вязкости в зависимости от частоты питающего напряжения при $\alpha_0=0,015$ рад.

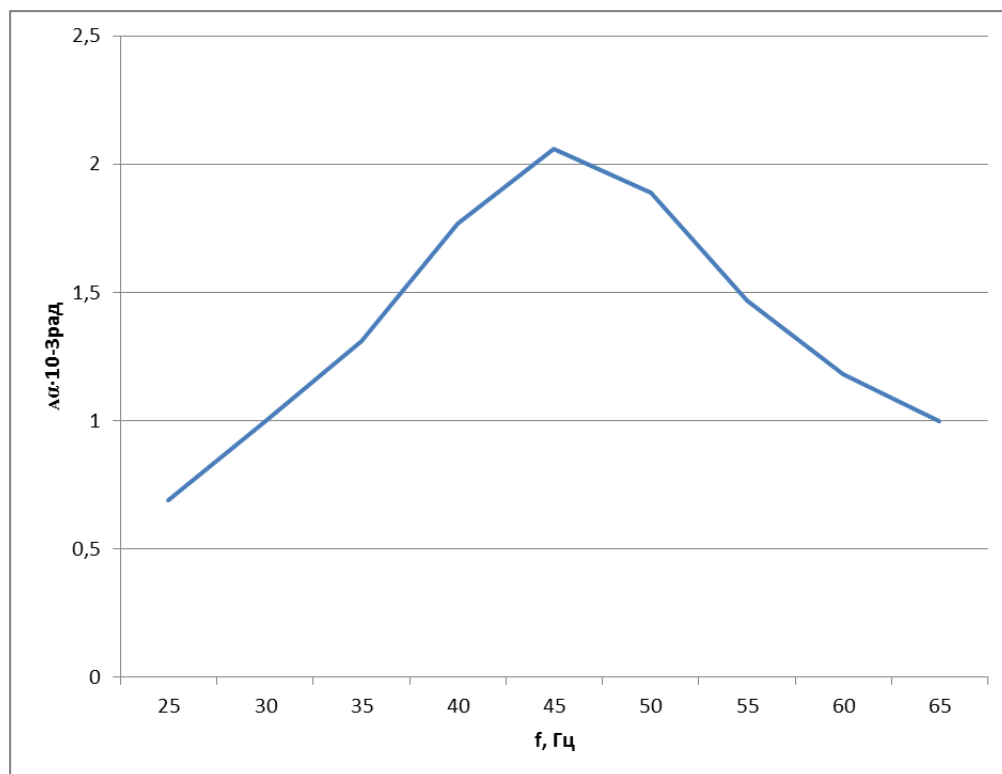


Рисунок 4.11 – зависимость амплитуды колебаний от частоты питающего напряжения при $\alpha_0=0,015$ рад

На рисунке 4.12 приведены характерные зависимости основных параметров вибратора: угла колебаний, электромагнитная сила притяжения и ток в основной цепи в зависимости от времени при частоте работы активатора $f=45$ Гц и начальном угле поворота коромысла $\alpha_0=0,015$ рад.

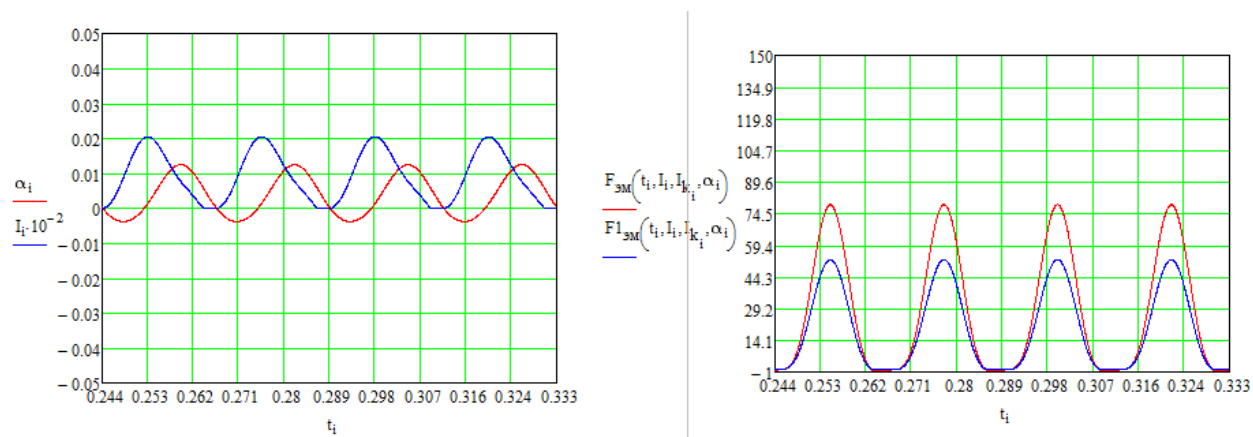


Рисунок 4.12 - Характерные зависимости основных параметров лабораторной установки

Из характеристики видно, что резонанс наблюдается при частоте $f=45$ Гц, и оптимальный начальный угол поворота коромысла $\alpha_0=0,015$ рад. Амплитуда колебаний активатора при этом составляет не менее 0,85 градусов или 2,7 мм, что обеспечивает достаточно высокое значение производительности активации 3,45 м³/час. Так же установлено, что максимальное значение тока установки равно 1,15 А.

4.4 Сравнение эффективности работы лабораторной установки с двумя электромагнитами

Необходимо проверить эффективность разрабатываемой лабораторной установки. Главное кардинальное отличие от существующих установок – наличие дополнительного электромагнита, работающего на специальную вставку. Для этого нужно проанализировать работу установки без

дополнительного электромагнита, аналогично анализу, представленному в пункте 4.3 для высоковязкой жидкости.

Для этого в математической модели задаёмся изменяемой частотой питающего напряжения с шагом 5 Гц. Общий диапазон изменения частоты выбираем от 30 до 70 Гц. Для каждого значения частоты рассчитываем амплитуду колебаний активатора, ток в обмотках и производительность активации. Расчётные данные заносим в таблицу 4.9.

Таблица 4.9 – Определение резонансной частоты при $R_{\text{мех}}=50$ кг/с для установки с одним электромагнитом

f, Гц	30	35	40	45	50	55	60	65	70
U, В	132	154	176	198	220	242	264	286	308
Id, А	1,3	1,33	1,36	1,4	1,45	1,49	1,52	1,54	1,54
Iкз, А	124,6	143,7	163,4	184,1	205,6	226,7	245,9	263,5	279,6
$\Delta\alpha \cdot 10^{-4}$ рад	2,84	3,06	3,25	3,33	3,24	3,02	2,71	2,54	2,37
V, м ³ /час	0,047	0,062	0,085	0,1	0,1	0,083	0,065	0,055	0,044

Из данной таблицы можно увидеть, что резонанс достигается при частоте 45 Гц. Для найденной резонансной частоты необходимо определить точно оптимальный начальный зазор при контроле величины допустимого тока, равному 2,45 А. Для этого в математической модели задаёмся изменяемым начальным углом с шагом 0,003 рад от 0,006 до 0,024 рад. Расчётные данные заносим в таблицу 4.10.

Таблица 4.10 – Определение оптимального начального угла активатора установки с одним электромагнитом

α_0 , рад	0,006	0,009	0,012	0,015	0,018	0,021	0,024
U, В	198	198	198	198	198	198	198
Id, А	0,81	0,97	1,11	1,21	1,4	1,54	1,68
Iкз, А	108,4	126,9	146,2	165,3	184,1	202,6	220,9
$\Delta\alpha \cdot 10^{-4}$ рад	3,41	3,54	3,47	3,39	3,33	3,26	3,19
V, м ³ /час	1,64	0,67	0,3	0,17	0,1	0,069	0,048

Наиболее результативным допустимым начальным углом коромысла будет являться угол в 0,006 рад. На рисунках 4.13 и 4.14 представлены частотные характеристики для жидкости высокой вязкости в зависимости от частоты питающего напряжения и начального угла поворота коромысла.

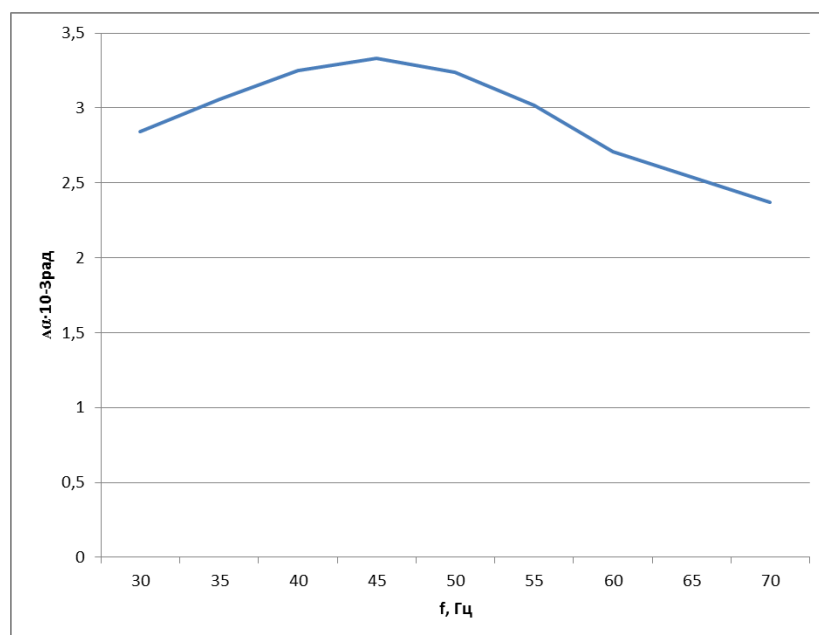


Рисунок 4.13 – зависимость амплитуды колебаний установки с одним электромагнитом от частоты питающего напряжения при $\alpha_0=0,018$ рад

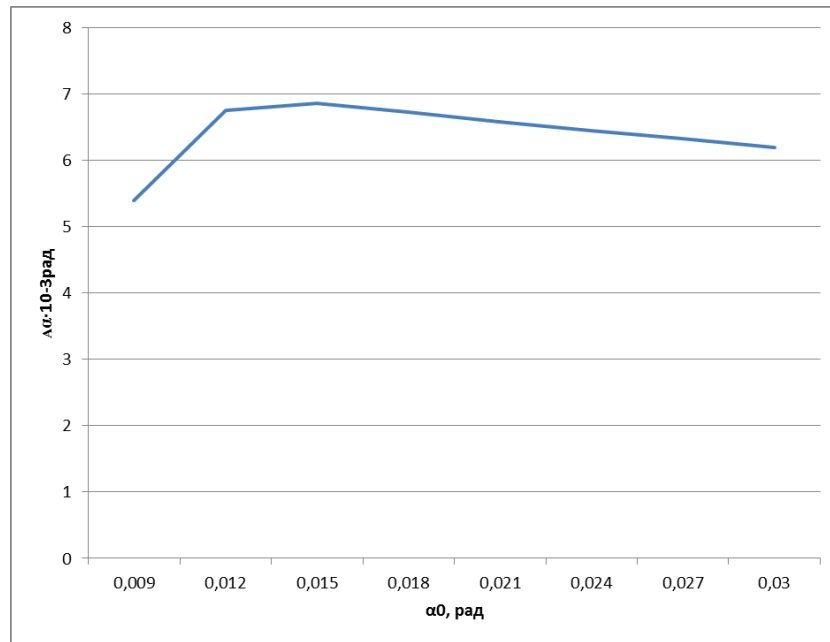


Рисунок 4.14 – зависимость амплитуды колебаний установки с одним электромагнитом от начального угла поворота коромысла при $f=45$ Гц

На рисунке 4.15 приведены характерные зависимости основных параметров вибратора: угла колебаний, электромагнитная сила притяжения и ток в основной цепи в зависимости от времени при частоте работы активатора $f=45$ Гц и начальном угле поворота коромысла $\alpha_0=0,006$ рад.

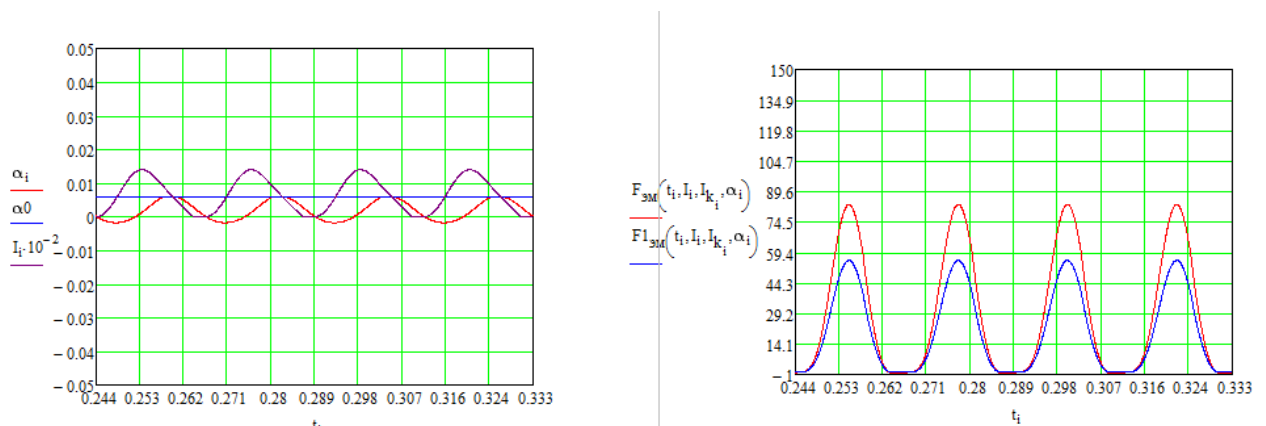


Рисунок 4.15 - Характерные зависимости основных параметров лабораторной установки

Из характеристики видно, что резонанс наблюдается при частоте $f=45$ Гц, и оптимальный начальный угол поворота коромысла $\alpha_0=0,006$ рад . Амплитуда

колебаний активатора при этом составляет не менее 0,34 градусов или 1 мм, что обеспечивает значение производительности активации 1,64 м³/час. Так же установлено, что максимальное значение тока установки равно 0,81 А.

На рисунках 4.16 и 4.17 изображены сравнения максимальной амплитуды и производительности в зависимости от частоты питающего напряжения для установок с одним и двумя электромагнитами.

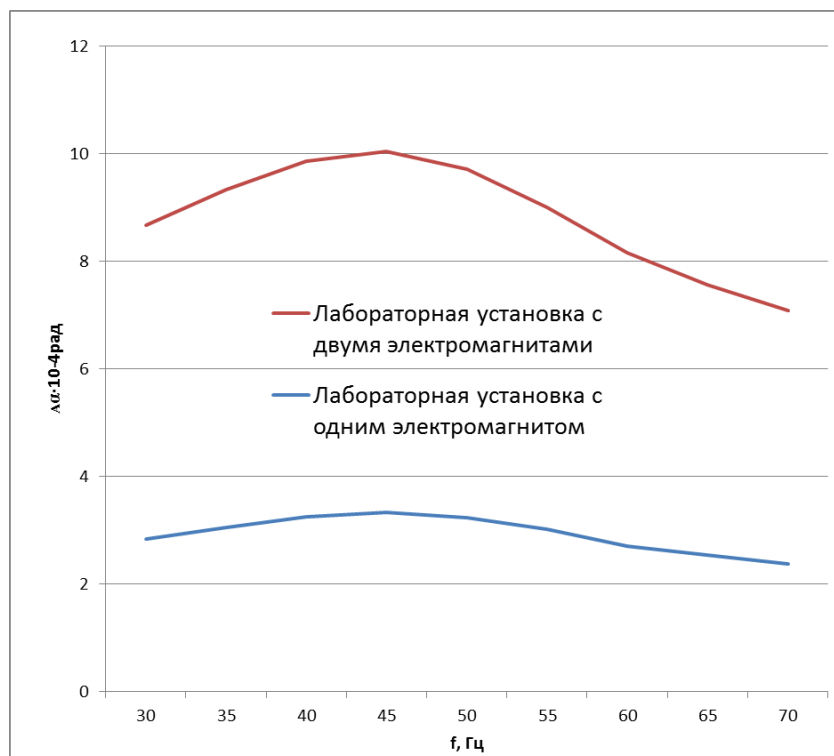


Рисунок 4.16 – Сравнение амплитуды колебаний для установок с одним и двумя электромагнитами

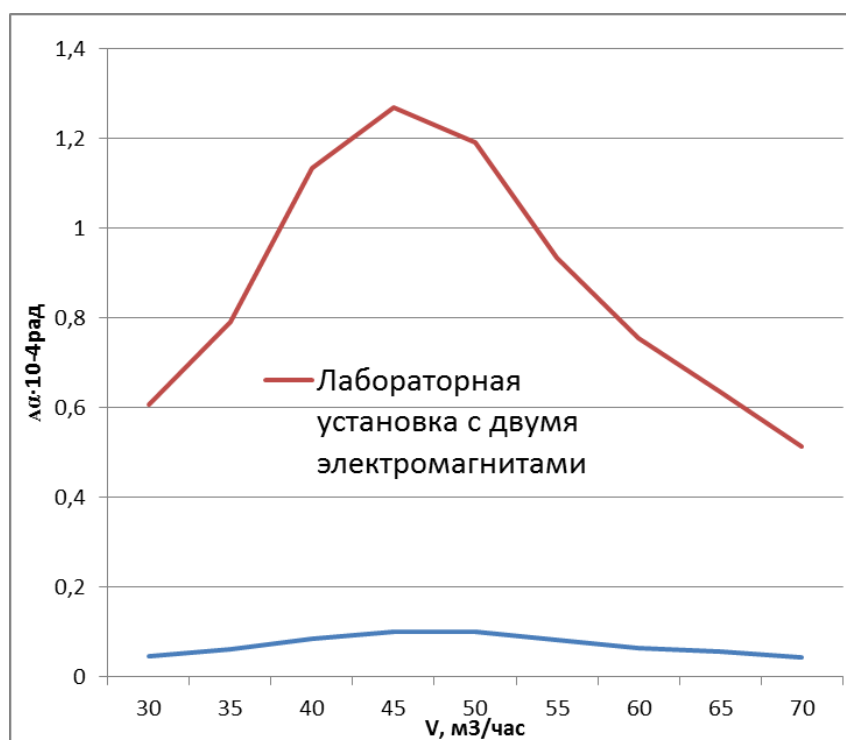


Рисунок 4.16 – Сравнение производительности для установок с одним и двумя электромагнитами

При помощи проведенного анализа были получены рекомендации по параметрам работы лабораторной установки исследования реологии жидкостей. При различных плотностях и вязкости жидкостей диапазон изменения резонансных частот находится в пределах от 45 до 60 Гц. Напряжение установки находится в диапазоне от 198 до 264 В. Максимальный ток, который протекает по обмоткам установки, составляет 2,38 А.

Также, сравнив производительность разрабатываемой установки с установкой с одним электромагнитом, можно сделать вывод, что применение дополнительного электромагнита позволяет повысить производительность обработки жидкостей более, чем в 2 раза, что можно увидеть в графиках на рисунках 4.16 и 4.17.

5. ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА УСТАНОВКИ

В схеме подключения лабораторной установки основными элементами являются: блок питания (диод, автоматический выключатель), виброактиватор, преобразователь частоты. На рисунке 5.1 изображена схема подключения лабораторной установки к сети.

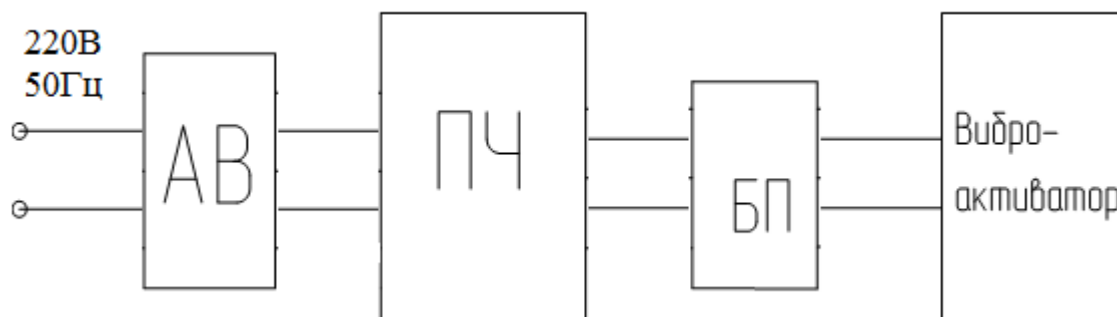


Рисунок 5.1 – Схема подключения регулируемого электропривода к сети

В таблице 5.1 представлены данные для выбора преобразователя

Таблица 5.1 - Данные для выбора преобразователя частоты

Диапазон регулирования частот, Гц	от 30 до 70
Номинальное напряжение сети, В	$U = 220$
Ток фазы, А	$I_{\text{полный}} = I_{\text{max}} \cdot k_z = 2,38 \cdot 1,2 = 2,86$ I_{max} - максимальный ток в катушке; k_z - коэффициент запаса (1,2);

5.1 Выбор преобразовательного устройства для системы

Преобразователь частоты подключен к сети с нерегулируемыми параметрами напряжения, а на выходе позволяет получать регулируемые параметры напряжения, в зависимости от задания. По исходным данным из таблицы 5.1 выбирается преобразователь частоты фирмы HYUNDAI серия N700E-007SF [7].



Рисунок 5.2 – Преобразователь частоты HYUNDAI N700E-007SF.

Частотный преобразователь N700E-007SF 0.75кВт 200-230В однофазный универсальный, предназначен для регулирования оборотов электродвигателей, диапазон мощности 0.75 кВт с полным векторным управлением. Отлично подходит для насосного и вентиляторного оборудования, а так-же другой промышленной техники (дробилки, центрифуги, транспортеры и т.д.).

Преимущества использования:

- встроенный блок регенеративного торможения (тормозной резистор является дополнительной опцией);
- отображение состояния каждой фазы;
- большое число функций дисплея частотного преобразователя;
- варьирование скорости - менее 1% на номинальной скорости;
- работа с ускорением в течение 1 сек. достигается после применения 150% нагрузки;

- улучшенные характеристики управления при низких скоростях;

В таблице 5.2 представлены данные выбранного преобразователя частоты.

Таблица 5.2 – Паспортные данные преобразователя частоты

Входные параметры	
Входное напряжение	1-фаза 220В
Частота	50/60 Гц $\pm 5\%$
Выходные параметры	
Мощность легкая/тяжелая нагрузка	0.75 кВт
Номинальный выходной ток	5 А
Точность частоты	Аналоговое: В пределах 0,1% от максимальной выходной частоты; Цифровое: В пределах 0,01% от максимальной выходной частоты
Режим управления	Управление по характеристике U/f, бессенсорное управление
Диапазон управления по частоте	от 0,1 до 400 Гц
Пусковой момент	1 Гц / 150% бессенсорное векторное управление
Кривая U/f	линейная, квадратичная, задаваемая по нескольким точкам
Сервисные функции	
Автоматическая регулировка напряжения (AVR)	Автоматическое поддержание постоянного выходного напряжения при изменении напряжения питания
Защита от перегрузки по напряжению	Есть
Защита от провала напряжения	Есть
Другие функции защиты	Защита от перегрева, перегрузки по току, обнаружение потери фазы

5.2 Выбор аппаратуры управления и защиты

5.2.1 Аппаратура управления

Управление лабораторной установкой, а именно БВО осуществляется в ручном режиме, посредством изменения напряжения и частоты входного тока, при помощи преобразователя частоты.

5.2.2 Аппаратура защиты

Преобразователь частоты уже оснащен различными защитными функциями, поэтому из элементов защиты добавим только автоматический выключатель, который будет защищать электрическую схему от токов короткого замыкания.

Для отдельного электроприемника :

$$1. I_{н.расц.} \geq I_{ном.ЭП} = 2,86 \text{ A.}$$

$$2. I_{уст} \geq 1,2 \cdot I_{пуск} = 1,2 \cdot 5 \cdot 2,38 = 14,28 \text{ A.}$$

Выбирается автоматический выключатель типа ВА25-29 [22].

Автоматические выключатели ВА25-29 предназначены для защиты электрических цепей переменного тока напряжением до 380 В и электроустановок от токов короткого замыкания и токов перегрузки, преимущества:

- высокая отключающая способность - 10 кА;
- цветовая индикация состояния контактных групп;
- возможность маркировки электрических цепей;
- удобный способ крепления на DIN-рейку, позволяющий быструю замену;
- возможность монтажа дополнительных устройств (блок-контакт, независимый расцепитель);
- возможность пломбирования рычагов выключателя как во включенном так и на выключенном положении.

Технические характеристики приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Параметры выключателя ВА25-29.

Число полюсов	1; 1+N; 2; 3; 3+N
Номинальный ток	В - 6; 10; 13; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63 А С - 0,5; 1; 1,6; 2; 4; 6; 10; 13; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63 А D - 0,5; 1; 1,6; 2; 4; 6; 10; 13; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63 А
Номинальная напряжение:	
для 1-полюсных выключателей	230 В
для 2- и 3-полюсных выключателей	400 В
Номинальная отключающая способность:	
0,5...40 А	10000 А
50...63 А	6000 А
Защитные характеристики	В (3-5) In; С (5-10) In; D (10-20) In
Условия эксплуатации	УХЛЗ
Диапазон рабочих температур	от -40 °С до +60 °С
Износостойкость (циклов В-О);	
механическая	не менее 20000
коммутационная	не менее 10000

5.3 Расчет и выбор типа и сечения кабеля сети

Выбор сечений для питающей линии в распределительных сетях до 1000

В производится по длительно допустимой нагрузке:

$$I_{\text{доп}} \geq \frac{I_{\text{ном}}}{k_{\text{прок}}} = \frac{2,68}{1} = 2,68 \text{ A},$$

$$I_{\text{доп}} \geq k_3 \cdot \frac{I_{\text{н.расц.}}}{k_{\text{прок}}} = 1 \cdot \frac{6}{1} = 6 \text{ A},$$

где $k_3 = 1$ – коэффициент защиты, для сетей требующей защиты от перегрузки.

$k_{\text{прок}} = 1$ – поправочный коэффициент зависящий от количества параллельно прокладываемых кабелей.

Выбор пал на трехжильный кабель ВВГ с сечением жилы $S = 1,5 \text{ мм}^2$ с $I_{\text{доп}} = 19 \text{ A}$, который используется в сухих и влажных помещениях [8].

5.4 Выбор диода

Диод - полупроводниковый прибор с одним р-п-переходом и двумя выводами. В лабораторной установки будет использоваться выпрямительный диод.

Для выбора диода зададимся, что $I_{\text{пр.мах}} = I_{\text{н}} = 10 \text{ A}$, значение $U_{\text{об.мах}} \geq U_{\text{н.}}$, исходя из этих условия выбираем диод типа Д232 с параметрами [10]:

- $U_{\text{об.мах}} = 400 \text{ В}$.
- $I_{\text{пр.мах}} = 10 \text{ A}$.
- диапазон рабочих температур $-60 \dots +130 \text{ C}^{\circ}$
- гарантийная наработка не менее – 10000 ч.

В результате были определены все основные элементы электрической схемы лабораторной установки, которые позволят при исследованиях реологических свойств жидкостей, обеспечить функционирование установки во всех возможных диапазонах режимов работы.

6. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью данного раздела является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- планирование научно-исследовательских работ;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

6.1 SWOT-анализ проекта

SWOT-анализ является инструментом стратегического менеджмента. Представляет собой комплексное исследование технического проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта [10].

Применительно к проектируемой АСР уровня, SWOT-анализ позволит оценить сильные и слабые стороны проекта, а также его возможности и угрозы.

Для проведения SWOT-анализа составляется матрица SWOT, в которую записываются слабые и сильные стороны проекта, а также возможности и угрозы.

При составлении матрицы SWOT удобно использовать следующие обозначения:

С – сильные стороны проекта;

Сл – слабые стороны проекта;

В – возможности;

У – угрозы;

Матрица SWOT приведена в таблице 6.1.

Таблица 6.1 - Матрица SWOT

	Сильные стороны проекта: С1. Высокая энергоэффективность и энергосбережение технологии. С2. Экологичность технологии. С3. Квалифицированный персонал. С4. Повышение безопасности производства С5. Уменьшение затрат на ремонт оборудования	Слабые стороны проекта: Сл1. Трудность монтажа оборудования Сл2. Дороговизна оборудования Сл3. Сложность эксплуатации электрооборудования
Возможности: В1. Увеличение производительности электрооборудования В2. Появление дополнительной автоматизированной системы управления насосной станцией В3. Снижение таможенных пошлин на оборудование используемых в лабораторной установке В4. Появление более простых универсальных электрических систем внутризаводской сети	В1С1С2С3С4; В2С1С5; В3С5; В4С1С4С5;	 В2Сл1Сл2; В3Сл2; В4Сл1Сл2Сл3;
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на технологии производства У2. Ограничения на экспорт технологии У3. Введения дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции	У1С3; У3С5;	У1Сл1Сл2; У3Сл2;

На основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации.

При построении интерактивных матриц используются следующие обозначения:

С – сильные стороны проекта;

Сл – слабые стороны проекта;

В – возможности;

У – угрозы;

«+» – сильное соответствие;

«-» – слабое соответствие;

Анализ интерактивных матриц, приведенных в таблицах 6.2 и 6.3, показывает, что сильных сторон у проекта значительно больше, чем слабых. Кроме того, угрозы имеют низкие вероятности, что говорит о высокой надежности проекта.

Таблица 6.2 - Интерактивные матрицы возможностей

Возможности	Сильные стороны проекта					
		С1	С2	С3	С4	С5
	В1	+	+	+	+	-
	В2	+	-	-	+	-
	В3	-	+	-	-	+
	В4	+	+	-	+	+
	Слабые стороны проекта					
		Сл1	Сл2	Сл3		
	В1	-	-	-		
	В2	+	+	+		
	В3	-	+	-		
	В4	-	-	-		

Таблица 6.3 - Интерактивные матрицы угроз

Угрозы	Сильные стороны проекта					
		C1	C2	C3	C4	C5
	Y1	-	-	+	-	-
	Y2	+	-	-	+	-
	Y3	-	-	-	+	+
	Y4	+	-	+	-	+
	Слабые стороны проекта					
		Сл1	Сл2	Сл3		
	Y1	+	+	-		
	Y2	-	-	+		
	Y3	-	+	+		
	Y4	-	-	+		

В результате анализа было установлено, что разрабатываемая установка имеет следующие минусы и угрозы: сложность эксплуатации и отсутствие спроса на данную установку. Данные проблемы решаются путем подбора квалифицированного персонала, который сможет обучить пользователей установки правильно пользоваться ей, и также представить данное изобретение обществу как экономически и энерго-эффективным, полезным и инновационным.

6.2 Планирование научно-исследовательских работ

6.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования; О
- определение участников каждой работы; О
- становление продолжительности работ; У
- Построение графика проведения научных исследований. П

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники, преподаватели, инженеры, лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В данном разделе составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования и произведено распределение исполнителей по видам работ. Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 6.4.

Таблица 6.4 - Распределение исполнителей по данным видам работ

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления технического проектирования завода	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
Расчеты и проектирование системы электроснабжения лабораторной установки	3	Проектирование системы внутризаводского электроснабжения	Инженер, научный руководитель
	4	Проектирование системы внутрицехового электроснабжения	Инженер, научный руководитель
	5	Проведение графических построений и обоснований (генплан завода и генплан цеха, разработка электрической схемы.)	Инженер, научный руководитель
Обобщение и оценка результатов	6	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер совместно с научным руководителем
Оформление отчета по техническому проектированию	7	Составление пояснительной записки	Инженер
	8	Проверка выпускной квалификационной работы руководителем	Научный руководитель

6.2.2 Определение трудоемкости выполнения технического проекта

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости используется следующая формула:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{мин}i} + 2t_{\text{макс}i}}{5}$$

где $t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы человек-дней.;

$t_{\text{мин}i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), человек-дней.;

$t_{\text{макс}i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), человек-дней.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{p_i} = \frac{t_{\text{ож}i}}{C_i}$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

6.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта - горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где T_{ki} - продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} - продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ - коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = \frac{365}{299} = 1,22$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа.

Все рассчитанные значения сведены в таблицу 6.5.

Таблица 6.5 – Рассчитанные сведения

Название Работы	Трудоёмкость работ						Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}		
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ожг}$, чел-дни			Науч. рук-ль	Инженер	Науч. рук-ль	Инженер	
	Науч. рук-ль	Инженер	Науч. рук-ль	Инженер	Науч. рук-ль	Инженер						
Составление и утверждение технического задания	1	-	2	-	1,4	-	1	-	1,4	-	1,7	
Подбор и изучение материалов по теме	-	3	-	6		4,2	1	1	-	4,2		5,12
Проектирование системы внутризаводского электроснабжения	2	15	4	25	2,8	19	1	1	2,8	19	3,41	23,18
Проектирование системы внутрицехового электроснабжения	2	20	4	25	2,8	19	1	1	2,8	19	3,41	28,18
Проведение графических построений и обоснований	1	15	2	14	1,4	10,8	1	1	1,4	10,8	1,7	18,17
Оценка эффективности полученных результатов	2	5	4	7	2,8	5,8	1	1	2,8	5,8	3,4	7,07
Составление пояснительной записки	-	6		10		7,6		1		7,6		9,27
Проверка выпускной квалификационной работы руководителем	3		5		3,8		1		3,8		4,6	
Итого											107,21	

Итого длительность работ – 110 календарных дней

На основе таблицы 5 строится календарный план - график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу. Календарный план-график проведения НИОКР приведен в таблице 6.6.

Таблица 6.6 - Календарный план-график

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _{кj} , кал.дн	Продолжительность выполнения работ													
				Фев.		Март			Апр.			Май			Июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление ТЗ	Руководитель	2	■													
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	5	■	■												
3	Проектирование системы внутризаводского ЭС	Инженер, Руководитель	23		■	■	■										
4	Проектирование системы внутрицехового ЭС	Инженер, Руководитель	28				■	■	■								
5	Проведение графических построений и обоснований	Инженер, Руководитель	19							■	■	■					
6	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер, Руководитель	7									■	■				
7	Составление пояснительной записки	Инженер	9										■	■			
8	Проверка ВКР	Руководитель	5											■	■		

Исходя из составленной диаграммы, можно сделать вывод, что продолжительность работ занимает 12 декад, начиная со второй декады

февраля, заканчивая первой декадой июня. Учитывая вероятностный характер оценки трудоемкости, реальная продолжительность работ может быть как меньше (при благоприятном стечении обстоятельств), так и несколько превысить указанную продолжительность (при неблагоприятном стечении обстоятельств).

Далее, по диаграмме Ганта можно предварительно оценить показатели рабочего времени для каждого исполнителя.

Занятость исполнителей сводится в таблицу 6.7.

Таблица 6.7 - Занятость исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней работы	25	85
Количество нерабочих дней за период выполнения проекта	6	24
Продолжительность выполнения проекта, в рабочих днях	19	61

Календарная продолжительность выполнения технического проекта составит 110 дней. Из них:

85 день – рабочая занятость инженера;

25 дней – рабочая занятость руководителя;

Продолжительность выполнения проекта в рабочих днях составит 80 дней. Из них:

61 дней – продолжительность выполнения работ инженером;

19 дней – продолжительность выполнения работ руководителем;

6.3 Расчет бюджета для научно-технического исследования

6.3.1 Расчет материальных затрат НТИ

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

- приобретаемые со стороны сырье и материалы, необходимые для создания научно-технической продукции;
- покупные материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции для обеспечения нормального технологического процесса и для упаковки продукции или расходуемых на другие производственные и хозяйственные нужды (проведение испытаний, контроль, содержание, ремонт и эксплуатация оборудования, зданий, сооружений, других основных средств и прочее), а также запасные части для ремонта оборудования, износа инструментов, приспособлений, инвентаря, приборов, лабораторного оборудования и других средств труда, не относимых к основным средствам, износ спецодежды и других малоценных и быстроизнашивающихся предметов;
- покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, подвергающиеся в дальнейшем монтажу или дополнительной обработке;
- сырье и материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, используемые в качестве объектов исследований (испытаний) и для эксплуатации, технического обслуживания и ремонта изделий – объектов испытаний (исследований);

В материальные затраты, помимо вышеуказанных, включаются дополнительно затраты на канцелярские принадлежности, диски, картриджи и т.п. Однако их учет ведется в данной статье только в том случае, если в научной организации их не включают в расходы на использование оборудования или накладные расходы. В первом случае на них определяются соответствующие нормы расхода от установленной базы. Во втором случае их величина учитывается как некая доля в коэффициенте накладных расходов.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi} ,$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками).

Величина коэффициента (k_T), отражающего соотношение затрат по доставке материальных ресурсов и цен на их приобретение, зависит от условий договоров поставки, видов материальных ресурсов, территориальной удаленности поставщиков и т.д. Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, приведены в таблице 6.8.

Таблица 6.8 - материальные затраты

Наименование	Ед. измерения	Количество		Цена за ед.,руб		Затраты на материалы, (Зм),руб.	
		Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Компьютер	Шт	1	1	31000	27000	31000	27000
Принтер	Шт	1	1	5000	3000	5000	3000
Mathcad	Шт	1	1	2500	2500	2500	2500
Бумага "SvetoCopy"	Шт	1	1	250	250	250	250
Спец. ПО	Шт	4	3	1500	700	6000	2100
Канцелярские принадлежности	-	-	-	-	-	1000	1000
Итого	81600					45750	35850

6.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада.

Полная заработная плата сотрудника ТПУ:

$$З_{полн} = З_{осн} + З_{доп},$$

где $З_{осн}$ - основная заработная плата;

$З_{доп}$ - дополнительная заработная плата (12-15 % от $З_{осн}$).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}},$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Среднедневная заработная плата для сотрудника ТПУ рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{тс}} + З_{\text{допл}} + З_{\text{р.к.}}}{F_{\text{д}}}$$

где, $F_{\text{д}}$ – количество рабочих дней в месяце (26 при 6-дневной рабочей неделе), раб. дн.

$З_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$З_{\text{допл}}$ – доплаты и надбавки, руб.;

$З_{\text{р.к.}}$ – районная доплата, руб.;

Основная заработная плата $З_{\text{осн}}$ руководителя от предприятия рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot T_p,$$

где $З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата работника, руб.;

$З_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.;

T_p – продолжительность работ, выполняемых техническим работником, раб.дн.

Расчет основной заработной платы приведен ниже.

$$З_{\text{рук}} = 24 \text{ ч} \cdot 300 \text{ руб/ч} = 7200 \text{ руб}$$

$$Z_{\text{инж.осн}} = 61 \text{ д} \cdot 561,5 \text{ руб/д} = 36497,5 \text{ руб}$$

$$Z_{\text{общ.осн}} = 7200 + 36497,5 = 43697,5 \text{ руб}$$

Дополнительная заработная плата составляет 12 – 15% от основной, расчет дополнительной и полной заработной платы приведен в таблице 6.9.

Таблица 6.9 - расчет дополнительной и полной заработной платы

Исполнители	$k_{\text{доп}}$	$Z_{\text{осн, руб.}}$	$Z_{\text{доп, руб.}}$	$Z_{\text{полн, руб.}}$
Руководитель	-	7200	-	7200
Инженер	0,12	36497,5	4379,7	40877,2
Итого $Z_{\text{осн, руб.}}$		43697,5	4379,7	48077,2

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

6.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2016 г. в соответствии с Федеральным закона от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1

ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2016 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды:

$$З_{внеб} = 0,271 \cdot 48077,2 = 13028,9 \text{ руб.}$$

6.3.4 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{накл} = (\text{сумма статей}) \cdot k_{нр},$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

6.3.5. Формирование сметы технического проекта

Рассчитанная величина затрат технического проекта является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку технической продукции.

К материальным затратам относятся: бумага, спец. ПО, канцелярские принадлежности. Компьютер, принтер и Mathcad после разработки установки можно продать. Срок эксплуатации составляет 7 лет, срок пользования составляет 4 месяца. Амортизация составляет:

$$A = \frac{(31000 + 27000 + 5000 + 3000 + 2500 + 2500) \cdot 4}{12 \cdot 7} = 3380,9 \text{ рублей}$$

Определение бюджета затрат на научно технический проект приведен в таблице 6.10.

Таблица 6.10 - Затраты на научно технический проект

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.
1. Материальные затраты	10600
2. Амортизация	3380,9
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	43697,5
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	4379,7
5. Отчисления во внебюджетные фонды	13028,9
6. Накладные расходы	25455,3
7. Бюджет затрат на технический проект	100542,3

Исходя из представленной выше таблицы, можно сделать вывод, что общие затраты на реализацию технического проекта составят примерно 101 тысячи рублей, из которых большую часть составят затраты по основной з/п. При необходимости снизить общие затраты на реализацию проекта, рекомендуется использовать в качестве выборки оборудования какое-либо другое исполнение.

6.4. Определение конкурентоспособности проекта

Определение конкурентоспособности проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

b_i – балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

Расчет показателя конкурентоспособности приведен в таблице 6.11.

Таблица 6.11 - Показатель конкурентоспособности

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Бальная оценка разработки
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,15	4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	4
3. Надежность	0,15	5
4. Безопасность	0,2	5
5. Простота эксплуатации	0,1	4
6. Конкурентоспособность продукта	0,1	4
7. Уровень проникновения на рынок	0,2	4
ИТОГО	1,0	30

$$I_{p-учн1} = 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,2 = 4,35$$

Также рассмотрим конкурентоспособность уже существующей установки для исследования реологии жидкостей – вискозиметра серии SV-1А. Преимуществом этой установки заключаются в распространенности на рынке, а недостатками являются: в неудобстве и сложности эксплуатации и меньшей надежности. Показатель конкурентоспособности данной установки приведены в таблице 6.12.

Таблица 6.12 - Показатель конкурентоспособности вискозиметра серии SV-1А

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Бальная оценка разработки
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,15	4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	3
3.Надежность	0,15	4
4.Безопасность	0,2	5
5.Простота эксплуатации	0,1	3
6.Конкурентоспособность продукта	0,1	4
7.Уровень проникновения на рынок	0,2	5
ИТОГО	1,0	30

$$I_{p-исп2} = 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,2 = 4.2$$

Показатель конкурентоспособности проекта имеет достаточно высокое значение (по 5-бальной шкале), больше существующего основного конкурента, что говорит об эффективности использования технического проекта. Высокие баллы надежности и помехоустойчивости позволяют судить о надежности системы.

7. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Данный раздел посвящен вопросам обеспечения необходимых условий труда (санитарно-гигиенические условия, защита от негативных производственных факторов, обеспечение пожарной безопасности) в соответствии с действующими нормативными документами, а также вопросам экологической безопасности и обеспечения безопасности в ЧС.

В настоящей выпускной квалификационной работе ведется исследование установки для исследований влияния технологии ВСМА на свойства жидкостей.

7.1 Анализ опасных и вредных факторов

Рассмотрим воздействующие на человека опасные и вредные производственные факторы в соответствии с классификацией [13].

Физические опасные и вредные производственные факторы:

1.1) Движущееся оборудование, подвижные части. Опасность травмирования исключена.

1.2) Нормами лаборатории установлена ежедневная влажная уборка помещения. Вытяжная вентиляция лаборатории не допускает превышения предельно допустимой концентрации вредных веществ [14].

1.3) Повышенная или пониженная температура поверхностей оборудования, материалов.

Лабораторная установка, состоящая из электромагнита, контейнера с веществом и кабелей соединения. Устройств, образующих холод, нет. Устройства, вырабатывающие тепло, скрыты защитной оболочкой.

1.4) Уровень шума на рабочем месте.

Основным источником шума магнитный активатор.

Воздействие шума отражается как на органах слуха, так и на общем психологическом состоянии человека. Возможны глухота, нервные расстройства.

1.5) Уровень вибрации.

Источники вибрации магнитный активатор.

1.6) Влажность воздуха.

Лабораторная установка не оказывает влияния на влажность воздуха.

1.7) Подвижность воздуха.

Лабораторная установка располагается в лаборатории. Под него отведено место. Высота лаборатории три метра. Поэтому нет преграды для нормальной циркуляции воздуха.

1.8) Значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.

Питание модуля управления осуществляется от напряжения 220 В частотой 50 Гц. Монтаж исключает соприкосновение инженера-исследователя с токоведущими частями. Режим сети – с заземленной нейтралью. Для обеспечения электробезопасности применяется защитное зануление.

1.9) Освещение рабочего места.

Причина возникновения заключается в несоответствии естественного и искусственного освещения установленным нормам. Слабое освещение приводит к напряжению глаз, что при длительном воздействии ведет к ухудшению зрения. Также возникает головная боль, нервное напряжение.

2) Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы.

2.1) Физические перегрузки.

2.1.1) Статические.

2.1.2) Динамические.

Лабораторная установка в рабочем состоянии при нормальных условиях труда не является источником статических и динамических физических перегрузок.

2.2) Нервно-психические перегрузки.

2.2.1) Умственное перенапряжение.

2.2.2) Перенапряжение анализаторов.

2.2.3) Монотонность труда.

2.2.4) Эмоциональные перегрузки.

Влияние данных факторов можно ослабить правильным режимом труда и отдыха, также стоит уделить внимание физкультминуткам.

7.2 Производственная санитария

Микроклимат

Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [14].

Работу по проведению испытаний можно отнести к категории 1б, поскольку у оператора возникает необходимость установки аппаратуры на стенд и подсоединения датчиков, что связано с физическим напряжением, затраты энергии составляют от 120 до 150 ккал/ч. Оптимальные и допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 - Оптимальные и допустимые нормы

Период года	Категория работ	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный (температура наружного воздуха +10°С и ниже)	Лёгкая – 1б	21-23	40-60	0,1
Тёплый (температура наружного воздуха выше +10°С)	Лёгкая – 1б	22-24	40-60	0,2

Для обеспечения нормального микроклимата предусматривается следующее:

Поддерживание параметров микроклимата в помещении обеспечивается отоплением и кондиционированием. Климатические условия, поддерживаются в пределах:

Температура, °С 15...30.

Относительная влажность воздуха, % 20...80.

Концентрация пыли в воздухе не более 0.5 мг/м³

Предусмотренные мероприятия обеспечивают параметры микроклимата в соответствии с нормами.

Так как источников выделения вредных веществ в помещении нет, то местной вентиляции не требуется.

В помещении ежедневно должна проводиться влажная уборка.

7.3 Шум и вибрация

Шум — один из наиболее распространенных неблагоприятных факторов производственной среды. Источниками звуков и шумов являются вибрирующие тела. Основные производственные процессы, сопровождающиеся шумом, — это клепка, штамповка, испытание авиамоторов, работа на ткацких станках и др. Говоря о действии шума на организм, следует иметь в виду, что он оказывает как местное, так и общее воздействие. При этом учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, изменяются двигательная и секреторная функции желудка и других органов. Неблагоприятно отражается шум на нервной системе, вызывая головные боли, бессонницу, ослабление внимания, замедление психических реакций, что в конечном счете приводит к понижению работоспособности [15].

Источником производственного шума и вибрации являются магнитный активатор.

Для защиты от шума предусматриваются:

При ВСМА следует учитывать параметры вибрации и шума, создаваемые установкой. В случае, когда величина вибрации и шума на рабочих местах превышает нормативные, следует применять глушители, гибкие вставки, амортизаторы и т.д. [16]. Уровень шума, представлен в таблице 7.2.

Нормативным эквивалентным уровнем звука на рабочих местах, является 80 дБА согласно СанПиН 2.2.4.3359-16 [18].

Вибрация установки, может оказать влияние на степень комфорта и эффективность работы, а в некоторых случаях на его здоровье и безопасность. Изделия должны быть спроектированы и изготовлены таким образом, чтобы риск вследствие создаваемой ими вибрации был сведен к минимуму, а в случаях когда, несмотря на принимаемые меры, полностью избежать вредного воздействия вибрации невозможно, изготовитель должен проинформировать об этом потенциального потребителя. Там же установлено, что в технических документах на потенциально виброопасную машину должна быть определена характеристика производимой машиной вибрации. Настоящий стандарт

посвящен методам измерения таких характеристик для самоходных машин. Знание параметров, характеризующих общую и локальную вибрацию, производимую разными машинами, позволяет потребителю ориентировочно оценить значение вибрационной экспозиции за смену для человека в конкретных условиях ее применения и выбрать машину с более низким уровнем вибрации [17].

7.4 Защита окружающей среды

Работа в лаборатории сопряжена с образованием и выделением газообразных, жидких и твердых веществ.

Газообразные вещества, загрязняющие воздух помещения: естественные выделения - углекислый газ, пары воды, летучие органические соединения - ЛОС (альдегиды, кетоны), азотистые соединения и др. органов дыхания человека; бытовая пыль; ЛОС, выделяющиеся в процессе эксплуатации отделочных материалов, лакокрасочных покрытий мебели и др. Перед выбросом воздух помещений подвергается обязательной очистке в фильтровентиляционных системах, что предотвращает атмосферу от загрязнения.

Жидкие отходы - бытовые отходы, образующиеся в процессах влажной уборки помещений, при пользовании водопроводом, туалетом и т.п., сбрасываются в городскую канализацию и далее поступают в системы централизованной очистки на городских очистных сооружениях.

При обращении с твердыми отходами: бытовой мусор (отходы бумаги, отработанные специальные ткани для протирки офисного оборудования и экранов мониторов, пищевые отходы); отработанные люминесцентные лампы; офисная техника, комплектующие и запчасти, утратившие в результате износа потребительские свойства. Бытовой мусор после предварительной сортировки складывают в специальные контейнеры для бытового мусора (затем специализированные службы вывозят мусор на городскую свалку); утратившее потребительские свойства офисное оборудование передают специальным

службам (предприятиям) для сортировки, вторичного использования или складирования на городских мусорных полигонах. Отработанные люминесцентные лампы утилизируются [19]. Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к 1 классу опасности. Ртуть люминесцентных ламп способна к активной воздушной и водной миграции. Интоксикация возможна только в случае разгерметизации колбы, поэтому основным требованием экологической безопасности является сохранность целостности отработанных ртутьсодержащих ламп. Отработанные газоразрядные лампы помещают в защитную упаковку, предотвращающую повреждение стеклянной колбы, и передают специализированной организации для обезвреживания и переработки. В случае боя ртутьсодержащих ламп осколки собирают щеткой или скребком в герметичный металлический контейнер с плотно закрывающейся крышкой, заполненный раствором марганцевокислого калия. Поверхности, загрязненные боем лампы, необходимо обработать раствором марганцевокислого калия и смыть водой. Контейнер и его внутренняя поверхность должны быть изготовлены из неадсорбирующего ртуть материала (винипласта).

К сфере защиты ОС и рационального использования природных ресурсов относится и экономия ресурсов, в частности, энергетических. Реальным вкладом здесь может стать экономия электрической и тепловой энергии на территории предприятия. Во-первых, это улучшает экономические показатели деятельности предприятия (уменьшение расходов на электротепловую энергию). Во-вторых, экономия энергии означает уменьшение газа, мазута, угля, сжигаемого в топках котлов ТЭС и электроустановок (котельных) промпредприятий города Томска и области и одновременное уменьшение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Несмотря на кажущуюся малость вклада в энергосбережение и в защиту атмосферного воздуха от загрязнения массовое движение в этом направлении, в том числе, в быту, принесет значимый эффект.

7.5 Предотвращение чрезвычайных ситуаций и устранение их последствий

Наиболее вероятные чрезвычайные ситуации в помещении: возникновение пожара (загорания) и электропоражение.

Пожар (загорание)

Основными причинами пожара могут быть: перегрузка проводов, короткое замыкание, большие переходные сопротивления в электрических цепях, электрическая дуга, искрение и неисправности оборудования.

Пожарная профилактика обеспечивается: системой предотвращения пожара, системой противопожарной защиты; организационно-техническими мероприятиями [20]. К мерам предотвращения пожара относятся: применение средств защитного отключения возможных источников загорания (защитного зануления), применение искробезопасного оборудования, устройства молниезащиты здания, выполнения правил (инструкций) по пожарной безопасности.

К мерам противопожарной защиты относятся: применение пожарных извещателей, средств коллективной и индивидуальной защиты от факторов пожара, системы автоматической пожарной сигнализации, порошковых или углекислотных огнетушителей, два ящика с песком 0,5 м³ [21].

Организационно-технические мероприятия: наглядная агитация и инструктаж работающих по пожарной безопасности, разработка схемы действий администрации и работающих в случае пожара и организация эвакуации людей, организация внештатной пожарной дружины.

При обнаружении загорания работающий должен немедленно сообщить по телефону 01 в пожарную охрану, сообщает руководителю, приступают к эвакуации людей и материальных ценностей. Тушение пожара организуется первичными средствами с момента обнаружения пожара. Пострадавшим при пожаре обеспечивается скорая медицинская помощь.

Выбирается огнетушитель типа 144В, объемом 10 литров [12].

Электропоражение

Помещение, где будет использоваться лабораторная установка, является помещением без повышенной опасности [11].

Современная система электробезопасности обеспечивает защиту от поражения в двух наиболее вероятных и опасных случаях:

- при прямом прикосновении к токоведущим частям электрооборудования;
- при косвенном прикосновении.

Под косвенным прикосновением понимается прикосновение человека к открытым проводящим частям оборудования, на которых в нормальном режиме (исправном состоянии) электроустановки отсутствует электрический потенциал, но при каких-либо неисправностях, вызвавших нарушение изоляции или ее пробой на корпус, на этих частях возможно появление опасного для жизни человека потенциала.

Для защиты от прямого прикосновения к токоведущим частям применение ограждений и оболочек, установка барьеров, размещение вне зоны досягаемости, устройства защитного отключения (УЗО).

Для защиты от косвенного прикосновения применяются: УЗО и защитное зануление [22].

Даже если при электропоражении работающий внешне сохранил формат нормального самочувствия, он должен быть осмотрен врачом с заключением о состоянии здоровья, т.е. пострадавшему должна быть обеспечена скорая медицинская помощь. Предварительно пострадавший должен быть освобожден от действия электрического тока. Если при этом отключить напряжение быстро невозможно, освобождение от электричества пострадавшего необходимо производить, изолировав себя диэлектрическими перчатками или галошами. При необходимости перерезать провода (каждый в отдельности) инструментом с изолированными ручками. Если есть необходимость (при потере сознания, остановке сердца и т.п.) оказания первой помощи, то до прибытия медработника необходимо начать делать: наружный массаж сердца, искусственное дыхание.

Для предотвращения от поражения электрическим током при прикосновении к корпусам электроустановок, находящихся под напряжением при пробое изоляции или в других случаях, необходимо рассчитать и установить защитное заземление.

Данные для расчёта заземления:

1. Заземление необходимо выполнить для установки, работающей под напряжением 220 В.
2. Для заземления используем трубы диаметром 4 мм и длиной 2,5 м и сталь полосовую 18х4 мм.
3. Заземлители расположены в ряд.
4. Характер грунта в месте установки заземления — глина. Заземлители установлены на глубину (от верхнего конца трубы) 17 см, а расстояние между трубами принимаем равной трём длинам заземлителей, т.е. $a=2$ м.

Верхние концы соединены с помощью полосовой стали. Определим, что для данного случая по нормам допускается сопротивление не более 4 Ом. Удельное сопротивление глины составляет $\rho_T = 0,6 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Учитывая применение грунта зимой и просыхания его летом, определяем расчётные значения ρ_{ε} и ρ_n при использовании трубчатых заземлителей соединительной полосы и соединительной полосы:

$$\rho_{\varepsilon} = \rho_T \cdot \kappa_{\varepsilon} = 0,6 \cdot 10^4 \cdot 1,9 = 1,14 \cdot 10^4 \text{ (Ом} \cdot \text{см)},$$

где $\kappa_{\varepsilon} = 1,9$ - коэффициент для вертикальных электродов;

$$\rho_n = \rho_T \cdot \kappa_n = 0,6 \cdot 10^4 \cdot 5 = 3 \cdot 10^4 \text{ (Ом} \cdot \text{см)},$$

где $\kappa_n = 5$ - коэффициент для горизонтальных электродов.

Определим величину сопротивлений одной забитой в землю трубы по выражению:

$$R_{\varepsilon} = \frac{\rho_{\varepsilon}}{2 \cdot \pi \cdot l_m} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l_m}{d} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot h_m + l_m}{4 \cdot h_m \cdot l_m} \right),$$

где h_m - глубина заземления, $h_m = 750$ см;

l_m - длина заземления, $l_m = 250$ см;

d - диаметр заземления, $d = 0,4$ см.

$$R_{\text{э}} = \frac{1,14 \cdot 10^4}{6,28 \cdot 250} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 250}{0,4} + 0,5 \cdot \ln \frac{750 + 250}{750 \cdot 250} \right) = 54,4 \text{ Ом.}$$

Определим число заземлителей:

$$n = \frac{R_{\text{э}}}{z} = \frac{54,4}{6} = 9 \text{ шт.}$$

Учитывая, что трубы соединены заземлительной полосой, которая выполняет роль заземлителя, уменьшаем число труб до 6 штук. Определим длину соединительной полосы:

$$l_m = 1,05 \cdot a \cdot (n-1) = 1,05 \cdot 2 \cdot (6-1) = 10,5 \text{ м,}$$

где n - число заземлителей;

a - расстояние между заземлителями.

Размер резервуара 5x5 м, длина соединительной полосы вписывается в его размер.

Результирующее сопротивление (полосы и трубы) с учётом коэффициента использования труб $J_{\text{э}}=0,85$ и полосы $J_{\text{л}}=0,86$ определяется по формуле:

$$R_c = \frac{R_{\text{э}} \cdot R_{\text{л}}}{R_{\text{э}} \cdot J_{\text{л}} + R_{\text{л}} \cdot J_{\text{э}} \cdot n} = \frac{54,4 \cdot 7,26}{54,4 \cdot 0,86 + 7,26 \cdot 0,85 \cdot 9} = 3,85 \text{ Ом.}$$

Данная величина удовлетворяет требованиям защитного заземления. Контроль заземления производится при приёме в эксплуатацию, а также периодически, в сроки, установленные правилами, при перекомпоновке оборудования и ремонте заземлителей.

Схема расположения устройства защитного заземления по отношению к резервуару показана на рисунке 7.1.

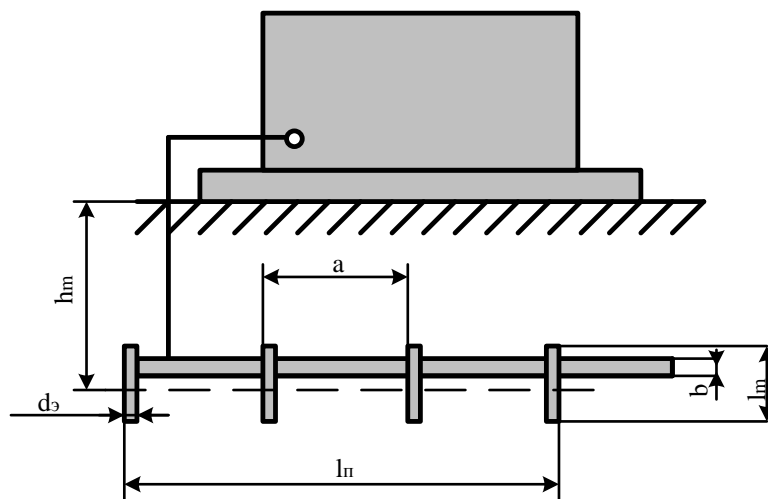


Рисунок 7.1 – Схема защитного заземления

В данном случае выполняем выносное заземление. Заземлители располагаются на некотором удалении от резервуара. Поэтому заземление корпуса находится вне поля растекания и человек, касаясь корпуса, оказывается под полным напряжением относительно земли. Выносное заземление защищает за счёт малого сопротивления заземлителей.

7.6 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

В соответствии с Трудовым кодексом РФ, в целях обеспечения требований охраны труда осуществляется контроль за их выполнением, в каждой организации численностью более 100 сотрудников создается служба охраны труда. Либо заключается договор со специалистами. Служба охраны труда подчиняется руководителю предприятия. На должность специалиста по охране труда назначаются имеющие квалификацию инженера по охране труда или прошедшие специальное обучение.

В соответствии с Трудовым кодексом, на производстве с численностью более десяти человек должны создаваться комитеты по охране труда, в состав которых входят представители работодателя и профсоюзов. Задачами комитета являются: организация по обеспечению выполнения работниками требований по охраны труда, контроль за соблюдением охраны труда, информация о состоянии охраны труда. Комитет по охране труда ведет учет и анализ

производственного травматизма и профессиональных заболеваний, измерение величин опасных и вредных факторов, оценку травмобезопасности, аттестацию рабочих мест, приемку в эксплуатацию производственных объектов, согласование документации в области охраны труда, участие в расследовании несчастных случаев, обучение по охране труда в соответствии со следующими документами:

- Трудовой кодекс РФ;
- ГОСТ 12.0.003–74 ССБТ [Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы];
- ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ [Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность];
- ГОСТ 12.0.004-90 ССБТ [Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Организация обучения безопасности труда];
- ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ [Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов];
- ГОСТ 12.1.045-84 ССБТ [Система стандартов безопасности труда. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля];
- СНиП П-12-77 [Защита от шума];
- СанПиН 1757-77 [Санитарно-гигиенические нормы допустимой напряженности электростатического поля];
- СанПиН 2.2.1/2.1.1.1.1278*03 [Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований следует сделать следующие выводы о практической ценности и новизне:

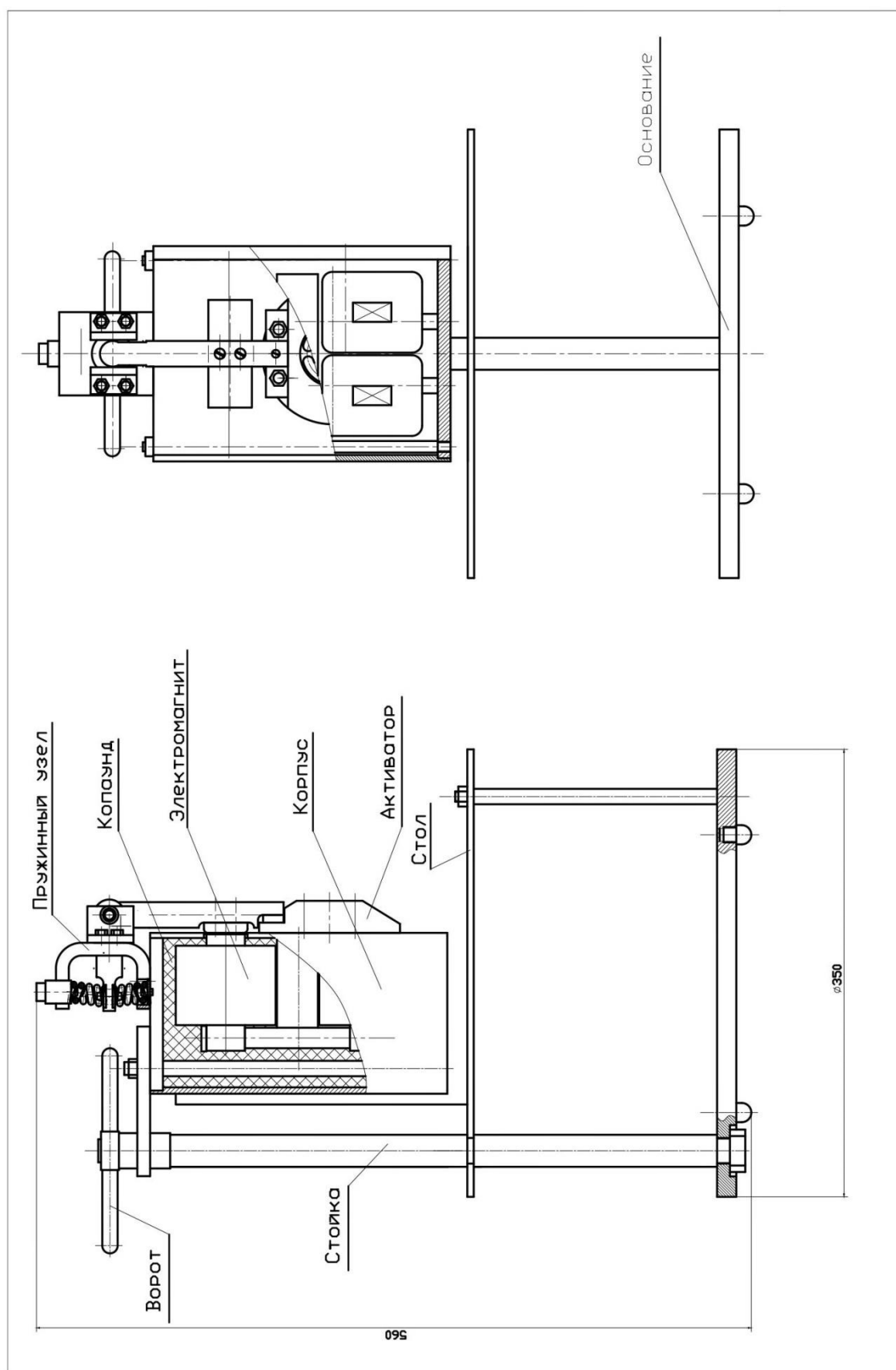
1. Разработана конструкция модернизированной лабораторной установки, для изучения реологических свойств высоковязких жидкостей и получены параметры режимов работы с различными жидкостями с учетом углового движения активатора, что позволило получить более точные и правильные результаты, относительно расчетов с линейным движением активатора.
2. Произведено улучшение конструкции лабораторной установки, при помощи дополнительного электромагнита, что привело к увеличению показателя производительности активации более чем в 2 раза.
3. Разработана математическая модель модернизированной лабораторной установки, позволяющая на стадии проектирования разрабатывать практические рекомендации по режимам обработки различных жидкостей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%96%D0%B8%D0%B4%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C> (дата обращения: 16.05.2018).
2. РАСЧЁТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ АКТИВАЦИИ ЖИДКИХ СРЕД: учеб. Пособие / В.А.Данекер
3. Основы виброструйной магнитной активации жидких сред / Рикконен С.В., к.т.н., доцент, зав. отделом ОАО «СКБ Сибэлектромотор».
4. Анализ результатов экспериментального исследования системы управления вибрационным электромагнитным активатором при работе в различных средах / Р. Ф. Бекишев [и др.]. // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ] / Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск, 2005. — Т. 308, № 7. — [С. 109-112]. — (Технические науки). — Заглавие с титульного листа. — [Библиогр.: с. 112 (3 назв.)].
5. URL: [http://www.mirpruzhin.ru/raschet_prugin_sgatiya/?p99=1&p1=1&p2=1&p3=5&p4=25&p6=300&p7=8&p9=250&p10=40&p22=1&submit=+](http://www.mirpruzhin.ru/raschet_prugin_sgatiya/?p99=1&p1=1&p2=1&p3=5&p4=25&p6=300&p7=8&p9=250&p10=40&p22=1&submit=)
(дата обращения: 16.05.2018).
6. URL: <https://www.chipdip.ru/product0/9000272026> (дата обращения: 16.05.2018).
7. URL: http://xn--80aqahnfuib9b.xn--p1ai/n700e_007sf.html
(дата обращения: 27.05.2018).
8. URL: <http://kabel-vvg.ru/tehnicheskie-harakteristiki-kabelya-vvg/>
(дата обращения: 27.05.2018)
9. URL: http://istochnikpitania.ru/index.files/Sprav_Diody1.files/Sprav1_Diody_15.htm
(дата обращения: 27.05.2018)
10. URL: <http://www.265260.ru/> (дата обращения: 02.05.2018) ПУЭ: правила устройства электроустановок

11. Постановление Правительства РФ от 25.04.2012 N 390 "О противопожарном режиме"
12. Правила устройства и безопасной эксплуатации (утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 16 мая 2003 г. N 31). Настоящим Правилам присвоен шифр ПБ 10-558-03.
13. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда.
14. (ОБЩИЕ САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВОЗДУХУ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ). ГОСТ 12.1.004-91, СС5Т "Пожарная безопасность. Общие требования."
15. ГОСТ 12.1.003-83 (Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности).
16. ГОСТ 12.1.012-90 "Вибрационная безопасность. Общие требования."
17. СанПиН 2.2.4.3359-16 "Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах".
18. Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 №681
19. ГОСТ 12.1.004-91, СС5Т "Пожарная безопасность. Общие требования."
20. СП 9.13130.2009 "Техника Пожарная. Огнетушители. Требования к эксплуатации."
21. ГОСТ 12.0.003-74 (СТ СЭВ 790-77). "Опасные и вредные производственные факторы. Классификация."
22. URL: http://xn--80aqahnfuib9b.xn--p1ai/n700e_007sf.html
(дата обращения: 27.05.2018).
23. URL: http://www.krugosvet.ru/enc/nauka_i_tehnika/fizika/ZHIDKOST.html
(дата обращения: 17.05.2018).

Приложение А Чертеж лабораторной установки



Приложение Б

Листинг в программе MathCad

Данные, задающие вычисление:

(выбираются самостоятельно для каждого режима)

$f := 70$	Частота напряжения питания
$m := 500$	Число итераций в периоде
$N := 15$	Число периодов расчёта
$P := 4.4$	Коэффициент пропорциональности питающего напряжения (может быть изменён)
$\alpha_0 := 0.018$	Начальный угол
$\mu_{ст} := 350$	Относительная магнитная проницаемость стали
$R_{m0} := 10$	Механическое сопротивление
$T_p := 3$	Время расчёта
$L_{1рыч} := 0.18$	Рычаг до активатора
$L_{2рыч} := 0.095$	Рычаг до доп.магнита

Входные данные:

$\mu_{ст} := 350$	$\mu_0 := 1.257 \cdot 10^{-6}$	
$a := 0.02$	Длина полюса магнитопровода, м (смотри ЗАДАНИЕ)	
$b := 0.015$	Ширина полюса магнитопровода, м (смотри ЗАДАНИЕ)	
$S_{пол} := a \cdot b$	Сечение полюсного наконечника	
$l_m := 0.187$	Длина магнитопровода, м (СМОТРИ чертёж магнитопровода)	
$W := 1060$	Число витков в катушке (РАСЧИТЫВАЕТСЯ)	
$M_a := 0.647$	Масса активатора, включая другие элементы (РАСЧИТЫВАЕТСЯ)	
$r_{эв} := 0.045$	Радиус активатора эквивалентный, м (принимается из чертежа АКТИВАТОРА)	
$M_{вст} := 0.090.0350.0087800$	Масса вставки	
$J_a := M_a \cdot L_{1рыч}^2$	$J_{вст} := M_{вст} \cdot L_{2рыч}^2$	Момент инерции активатора и специальной вставки

$R_{k1} := 2.4\Omega$ Активное сопротивление основного контура, одной катушки Ом
(Определяется расчётом)

$\rho_{k3} := 0.017\frac{\Omega}{\text{мм}}$ Проводимость материала к.з. витка (нержавеющая сталь)

$D_{k3} := \frac{(a + b + 0.01)}{2}$ Диаметр к.з. витка

$l_{k3} := D_{k3} \cdot \pi$ Длина контура к.з. витка

$\tau_{CT} := 0.001$ Толщина стенки корпуса, м

$S_{k3} := 1.0\text{мм}^2$ Сечение к.з. витка, мм.кв.

$l_k := 0.0\text{м}$ Длина магнитопровода к.з. витка, м

$\rho_{ж} := 850\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ Плотность жидкости, кг/м.куб. (принимается по условиям задания)

Присоединённая масса жидкости:

$Q_{кр} := \frac{8}{3} \rho_{ж} \cdot r_{экв}^3$ $Q_{кр} = 0.26667$ Для активатора круглого сечения

$J_{кр} := Q_{кр} \cdot L1_{рыч}^2$ Момент инерции присоединенной жидкости

Электрические параметры контуров

Активное сопротивление к.з. контура, Ом

$R01_{k3} := \rho_{k3} \frac{l_{k3}}{S_{k3}}$

$R02_{k3} := \rho_{k3} \frac{l_{k3}}{S_{k3}}$

$R1_{k3} := R01_{k3} \cdot (1 + 0.004 \cdot 100) = 2.055 \times 10^{-3}$

$R2_{k3} := R02_{k3} \cdot (1 + 0.004 \cdot 100)$

Индуктивность обмотки основной, Гн

$L1_{об}(\alpha, l1) := \frac{W^2 \cdot \mu_{CT} \cdot \mu_0 \cdot S_{пол}}{[L1_{рыч} \cdot (\sin(\alpha_0) - \sin(\alpha)) + \tau_{CT}] \cdot \mu_{CT} + l_m}$

$L2_{об}(\alpha, l2) := \frac{W^2 \cdot \mu_{CT} \cdot \mu_0 \cdot S_{пол}}{[L2_{рыч} \cdot (\sin(\alpha_0) - \sin(\alpha)) + \tau_{CT}] \cdot \mu_{CT} + l_m}$

$LL1(\alpha, l1) := \frac{d}{d\alpha} L1_{об}(\alpha, l1)$

$LL2(\alpha, l2) := \frac{d}{d\alpha} L2_{об}(\alpha, l2)$

Взаимоиндуктивность основных контуров, Гн:

$M1_{12}(\alpha, l1) := \frac{W^2 \cdot \mu_{CT} \cdot \mu_0 \cdot S_{пол}}{[L1_{рыч} \cdot (\sin(\alpha_0) - \sin(\alpha)) + \tau_{CT}] \cdot \mu_{CT} + l_m}$

$M2_{12}(\alpha, l2) := \frac{W^2 \cdot \mu_{CT} \cdot \mu_0 \cdot S_{пол}}{[L2_{рыч} \cdot (\sin(\alpha_0) - \sin(\alpha)) + \tau_{CT}] \cdot \mu_{CT} + l_m}$

$MM1_{12}(\alpha, l1) := \frac{d}{d\alpha} M1_{12}(\alpha, l1)$

$MM2_{12}(\alpha, l2) := \frac{d}{d\alpha} M2_{12}(\alpha, l2)$

Взаимоиндуктивность к.з. контура, Гн

$$M_{k12}(\alpha, I1) := \frac{W \cdot \mu_0 \cdot S_{\text{пол}}}{[L1_{\text{рыч}} \cdot (\sin(\alpha 0) - \sin(\alpha)) + \tau_{\text{ст}}]}$$

$$M_{k12}(\alpha, I2) := \frac{W \cdot \mu_0 \cdot S_{\text{пол}}^x}{[L2_{\text{рыч}} \cdot (\sin(\alpha 0) - \sin(\alpha)) + \tau_{\text{ст}}]}$$

$$MM1_k(\alpha, I1) := \frac{d}{d\alpha} M_{k12}(\alpha, I1)$$

$$MM2_k(\alpha, I2) := \frac{d}{d\alpha} M_{k12}(\alpha, I2)$$

Индуктивность к.з. контура, Гн

$$L1_{k3}(I1) := \frac{\mu_{\text{ст}} \cdot \mu_0 \cdot S_{\text{пол}}}{l_k}$$

$$L2_{k3}(I2) := \frac{\mu_{\text{ст}} \cdot \mu_0 \cdot S_{\text{пол}}}{l_k}$$

$$LL1k(\alpha, I1) := \frac{d}{d\alpha} L1_{k3}(I1)$$

$$LL2k(\alpha, I2) := \frac{d}{d\alpha} L2_{k3}(I2)$$

$$R1_{k3} = 2.055 \times 10^{-3}$$

$$L1_{06}(0, 0) = 0.13313$$

$$M1_{k12}(0, 0) = 1.41418 \times 10^{-4}$$

$$R2_{k3} = 2.055 \times 10^{-3}$$

$$L2_{06}(0, 0) = 0.19591$$

$$M2_{k12}(0, 0) = 2.21258 \times 10^{-4}$$

К определению жёсткости пружины колебательной системы:

Резонансная частота (собственная частота), Гц

Определяется в задании

$$f_0 := 75 \quad \omega_0 := 2 \cdot \pi \cdot f_0$$

$$q1 := \omega_0^2 \cdot (J_a + J_{\text{вст}}) \quad q1 = 5.04906 \times 10^3$$

$$q2 := 500q1 \quad \text{Жёсткость перегородки корпуса активатора (принимается условно)}$$

$$q(\alpha) := q1$$

Собственная частота при работе в жидкости

$$\omega_{0ж} := \sqrt{\frac{q1}{J_a + J_{\text{вст}} + J_{\text{кр}}}} \quad \omega_{0ж} = 401.14406 \quad f_{0ж} := \frac{\omega_{0ж}}{2 \cdot \pi} \quad f_{0ж} = 63.84406$$

Расчётное усреднённое значение механического сопротивления (вода), кг/сек

$$Rm0 := \sqrt{2 \cdot (J_a + J_{\text{кр}})^2 \cdot (\omega_{0ж}^2 - \omega_{жр}^2)} \quad Rm0 = 10.44279$$

ВВОДИМЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАСЧЁТА

$$Rm(t, y) := Rm0$$

$$Rm(0, 0) = 10.44279$$

ПЕРЕМЕННЫЕ РАСЧЁТА

Угловая частота напряжения, сек⁻¹

$$\omega := 2\pi \cdot f \quad \omega = 439.82297$$

Период колебаний, сек

$$T_{\text{пер}} := \frac{1}{f} \quad T_{\text{пер}} = 0.01429$$

Шаг расчёта, сек

$$h := \frac{T_{\text{зад}}}{M} \quad h = 2.85714 \times 10^{-5}$$

Время расчёта, сек

$$T_{\text{расч}} := N \cdot T_{\text{пер}} \quad T_{\text{расч}} = 0.21429$$

Количество циклов расчёта

$$n := \frac{T_{\text{расч}}}{h} \quad n = 7.5 \times 10^3$$

Амплитуда входного напряжения, В

$$E_m := P \cdot f$$

Напряжение питания

$$E(t) := E_m \cdot \sin(\omega t) \quad E_m = 308$$

Намагничивающая сила одного стержня, А

$$J1(I1, I1_k) := I1 \cdot W - I1_k \quad J2(I2, I2_k) := I2 \cdot W - I2_k$$

Момент вращения

$$M_{B1}(t, I1, I1_k, \alpha) := L1_{\text{рыч}} \cdot \mu_0 \cdot S_{\text{пол}} \frac{2 \cdot J1(I1, I1_k)^2}{[L1_{\text{рыч}} \cdot (\alpha_0 + 0.0058 - \alpha)]^2} \quad M_{B2}(t, I2, I2_k, \alpha) := L2_{\text{рыч}} \cdot \mu_0 \cdot S_{\text{пол}} \frac{2 \cdot J2(I2, I2_k)^2}{[L2_{\text{рыч}} \cdot (\alpha_0 + 0.0058 - \alpha)]^2}$$

$$J_{\text{общ}} := M_a \cdot L1_{\text{рыч}}^2 + M_{\text{вст}} \cdot L2_{\text{рыч}}^2 \quad \Sigma M(t, I1, I2, I1_k, I2_k, \alpha) := M_{B1}(t, I1, I1_k, \alpha) + M_{B2}(t, I2, I2_k, \alpha)$$

Электромагнитная сила притяжения активатора к индуктору, Н

$$F_{\text{ЭМХ}}(t, I1, I1_k, I2, I2_k, \alpha) := \mu_0 \cdot S_{\text{пол}} \left[\frac{J1(I1, I1_k)^2}{[L1_{\text{рыч}} \cdot (\alpha_0 - \alpha)]^2} + \frac{J2(I2, I2_k)^2}{[L1_{\text{рыч}} \cdot (\alpha_0 - \alpha)]^2} \right]$$

Уравнения основных контуров

$$F11(t, I1, I1_k, \alpha, y) := \frac{E(t) - 2I1 \left(R_{k1} + LL1(\alpha, I1) \cdot y + MM1_{12}(\alpha, I1) \cdot y - \frac{M1_{k12}(\alpha, I1)}{L1_{k3}(I1)} \cdot MM1_k(\alpha, I1) \cdot y \right) - 2 \cdot I1_k \left[MM1_k(\alpha, I1) \cdot y - \frac{M1_{k12}(\alpha, I1) \cdot (R1_{k3} + LL1_k(\alpha, I1) \cdot y)}{L1_{k3}(I1)} \right]}{2 \left(L1_{\text{об}}(\alpha, I1) + M1_{12}(\alpha, I1) - \frac{M1_{k12}(\alpha, I1)^2}{L1_{k3}(I1)} \right)}$$

$$F21(t, I2, I2_k, \alpha, y) := \frac{E(t) - 2I2 \left(R_{k1} + LL2(\alpha, I2) \cdot y + MM2_{12}(\alpha, I2) \cdot y - \frac{M2_{k12}(\alpha, I2)}{L2_{k3}(I2)} \cdot MM2_k(\alpha, I2) \cdot y \right) - 2 \cdot I2_k \left[MM2_k(\alpha, I2) \cdot y - \frac{M2_{k12}(\alpha, I2) \cdot (R2_{k3} + LL2_k(\alpha, I2) \cdot y)}{L2_{k3}(I2)} \right]}{2 \left(L2_{\text{об}}(\alpha, I2) + M2_{12}(\alpha, I2) - \frac{M2_{k12}(\alpha, I2)^2}{L2_{k3}(I2)} \right)}$$

Уравнения к.з. контуров

$$F12(t, l1, l1_k, \alpha, y) := \frac{-l1_k \left[(R1_{k3} + LL1_k(\alpha, l1) \cdot y) - \frac{M1_{k12}(\alpha, l1)}{L1_{o6}(\alpha, l1) + M1_{12}(\alpha, l1)} \cdot MM1_k(\alpha, l1) \cdot y \right] - \frac{M1_{k12}(\alpha, l1)}{2(L1_{o6}(\alpha, l1) + M1_{12}(\alpha, l1))} \cdot E(t) - l1 \left[M1_{k12}(\alpha, l1) \cdot y - \frac{M1_{k12}(\alpha, l1)}{L1_{o6}(\alpha, l1) + M1_{12}(\alpha, l1)} (Rk1 + LL1(\alpha, l1) \cdot y + MM1_{12}(\alpha, l1) \cdot y) \right]}{L1_{k3}(l1) - \frac{M1_{k12}(\alpha, l1)^2}{L1_{o6}(\alpha, l1) + M1_{12}(\alpha, l1)}}$$

$$F22(t, l2, l2_k, \alpha, y) := \frac{-l2_k \left[(R2_{k3} + LL2_k(\alpha, l2) \cdot y) - \frac{M2_{k12}(\alpha, l2)}{L2_{o6}(\alpha, l2) + M2_{12}(\alpha, l2)} \cdot MM2_k(\alpha, l2) \cdot y \right] - \frac{M2_{k12}(\alpha, l2)}{2(L2_{o6}(\alpha, l2) + M2_{12}(\alpha, l2))} \cdot E(t) - l2 \left[M2_{k12}(\alpha, l2) \cdot y - \frac{M2_{k12}(\alpha, l2)}{L2_{o6}(\alpha, l2) + M2_{12}(\alpha, l2)} (Rk1 + LL2(\alpha, l2) \cdot y + MM2_{12}(\alpha, l2) \cdot y) \right]}{L2_{k3}(l2) - \frac{M2_{k12}(\alpha, l2)^2}{L2_{o6}(\alpha, l2) + M2_{12}(\alpha, l2)}}$$

Уравнения механического контура

$$F3(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) := \frac{M_{B1}(t, l1, l1_k, \alpha) + M_{B2}(t, l2, l2_k, \alpha) - Rm(t, y) \cdot y - q(\alpha) \cdot \alpha}{\text{Jobц}}$$

$$F4(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) := y$$

Расчёт коэффициентов методом Рунге-Кутты:

$$k1(t, l1, l1_k, \alpha, y) := h \cdot F11(t + h, l1, l1_k, \alpha, y)$$

$$m1(t, l1, l1_k, \alpha, y) := h \cdot F12(t + h, l1, l1_k, \alpha, y)$$

$$b1(t, l2, l2_k, \alpha, y) := h \cdot F21(t + h, l2, l2_k, \alpha, y)$$

$$p1(t, l2, l2_k, \alpha, y) := h \cdot F22(t + h, l2, l2_k, \alpha, y)$$

$$s1(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) := h \cdot F3(t + h, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y)$$

$$c1(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) := h \cdot F4(t + h, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y)$$

$$k2(t, l1, l1_k, \alpha, y) := h \cdot \left(F11(t + h, l1, l1_k, \alpha, y) + \frac{k1(t, l1, l1_k, \alpha, y)}{2} \right)$$

$$m2(t, l1, l1_k, \alpha, y) := h \cdot \left(F12(t + h, l1, l1_k, \alpha, y) + \frac{m1(t, l1, l1_k, \alpha, y)}{2} \right)$$

$$b2(t, l2, l2_k, \alpha, y) := h \cdot \left(F21(t + h, l2, l2_k, \alpha, y) + \frac{b1(t, l2, l2_k, \alpha, y)}{2} \right)$$

$$p2(t, l2, l2_k, \alpha, y) := h \cdot \left(F22(t + h, l2, l2_k, \alpha, y) + \frac{p1(t, l2, l2_k, \alpha, y)}{2} \right)$$

$$s2(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) := h \cdot \left(F3(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) + \frac{s1(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y)}{2} \right)$$

$$c2(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) := h \cdot \left(F4(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) + \frac{c1(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y)}{2} \right)$$

$$k3(t, l1, l1_k, \alpha, y) := h \cdot \left(F11(t + h, l1, l1_k, \alpha, y) + \frac{k2(t, l1, l1_k, \alpha, y)}{2} \right)$$

$$m3(t, l1, l1_k, \alpha, y) := h \cdot \left(F12(t + h, l1, l1_k, \alpha, y) + \frac{m2(t, l1, l1_k, \alpha, y)}{2} \right)$$

$$b3(t, l2, l2_k, \alpha, y) := h \cdot \left(F21(t + h, l2, l2_k, \alpha, y) + \frac{b2(t, l2, l2_k, \alpha, y)}{2} \right)$$

$$p3(t, l2, l2_k, \alpha, y) := h \cdot \left(F12(t + h, l2, l2_k, \alpha, y) + \frac{p2(t, l2, l2_k, \alpha, y)}{2} \right)$$

$$s3(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) := h \cdot \left(F3(t + h, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) + \frac{s2(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y)}{2} \right)$$

$$c3(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) := h \cdot \left(F4(t + h, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) + \frac{c2(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y)}{2} \right)$$

$$k4(t, l1, l1_k, \alpha, y) := h \cdot (F11(t + h, l1, l1_k, \alpha, y) + k3(t, l1, l1_k, \alpha, y))$$

$$m4(t, l1, l1_k, \alpha, y) := h \cdot (F12(t + h, l1, l1_k, \alpha, y) + m3(t, l1, l1_k, \alpha, y))$$

$$b4(t, l2, l2_k, \alpha, y) := h \cdot (F21(t + h, l2, l2_k, \alpha, y) + b3(t, l2, l2_k, \alpha, y))$$

$$p4(t, l2, l2_k, \alpha, y) := h \cdot (F22(t + h, l2, l2_k, \alpha, y) + m3(t, l2, l2_k, \alpha, y))$$

$$s4(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) := h \cdot (F3(t + h, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) + s3(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y))$$

$$c4(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) := h \cdot (F4(t + h, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) + c3(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y))$$

$$\underset{\text{KK}}{K}(t, l1, l1_k, \alpha, y) := \frac{k1(t, l1, l1_k, \alpha, y) + 2 \cdot k2(t, l1, l1_k, \alpha, y) + 2 \cdot k3(t, l1, l1_k, \alpha, y) + k4(t, l1, l1_k, \alpha, y)}{6}$$

$$\underset{\text{MM}}{M}(t, l1, l1_k, \alpha, y) := \frac{m1(t, l1, l1_k, \alpha, y) + 2 \cdot m2(t, l1, l1_k, \alpha, y) + 2 \cdot m3(t, l1, l1_k, \alpha, y) + m4(t, l1, l1_k, \alpha, y)}{6}$$

$$B(t, l2, l2_k, \alpha, y) := \frac{b1(t, l2, l2_k, \alpha, y) + 2 \cdot b2(t, l2, l2_k, \alpha, y) + 2 \cdot b3(t, l2, l2_k, \alpha, y) + b4(t, l2, l2_k, \alpha, y)}{6}$$

$$\underset{\text{PP}}{P}(t, l2, l2_k, \alpha, y) := \frac{p1(t, l2, l2_k, \alpha, y) + 2 \cdot p2(t, l2, l2_k, \alpha, y) + 2 \cdot p3(t, l2, l2_k, \alpha, y) + p4(t, l2, l2_k, \alpha, y)}{6}$$

$$\underset{\text{SS}}{S}(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) := \frac{s1(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) + 2 \cdot s2(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) + 2 \cdot s3(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) + s4(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y)}{6}$$

$$\underset{\text{CC}}{C}(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) := \frac{c1(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) + 2 \cdot c2(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) + 2 \cdot c3(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y) + c4(t, l1, l1_k, l2, l2_k, \alpha, y)}{6}$$

Расчёт переходного процесса:

$$i := 0..n$$

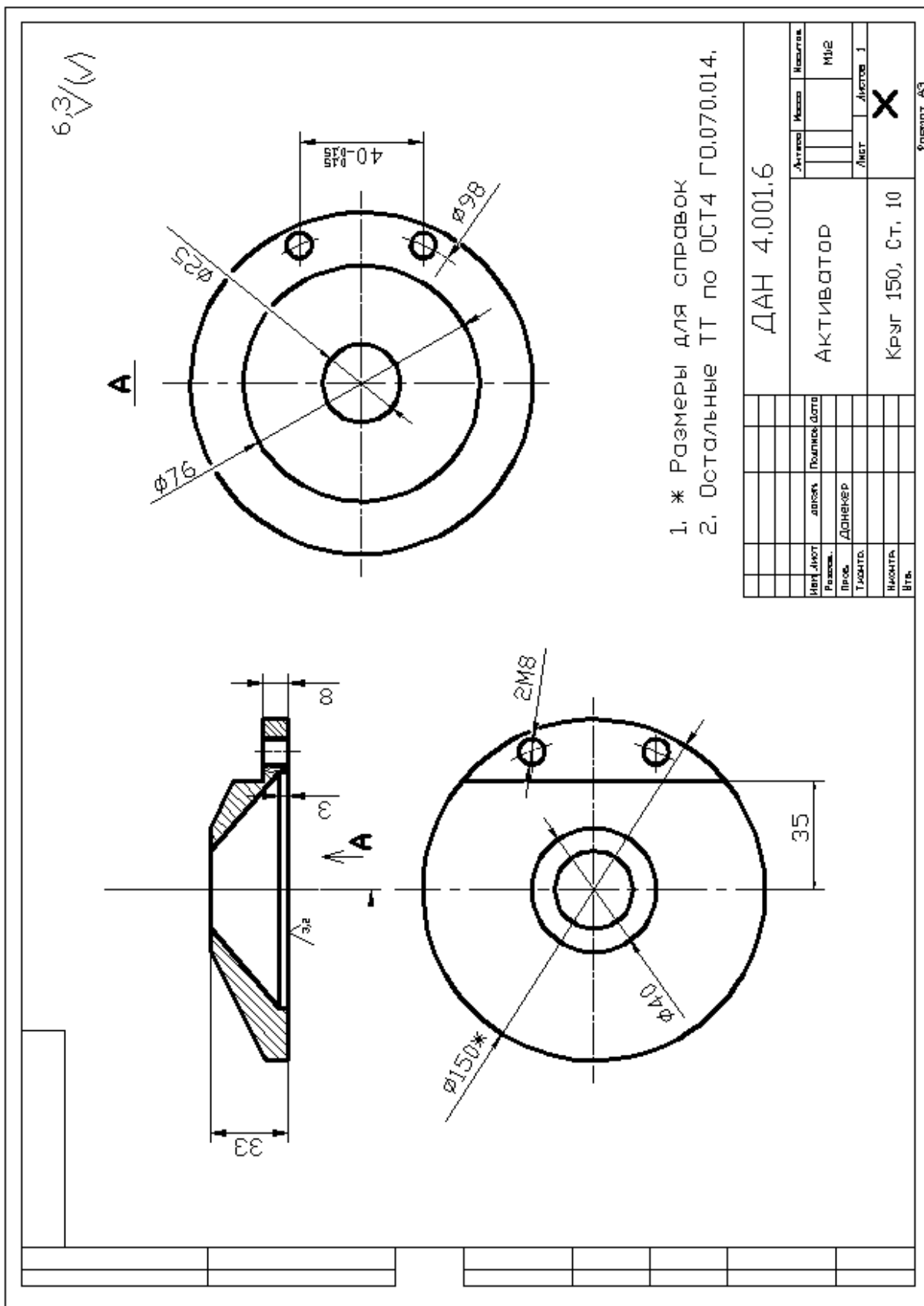
$$n = 7.5 \times 10^3$$

$$\begin{pmatrix} t_0 \\ l1_0 \\ l1_{k0} \\ l2_0 \\ l2_{k0} \\ y_0 \\ \alpha_0 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} t_{i+1} \\ l1_{i+1} \\ l1_{k+1} \\ l2_{i+1} \\ l2_{k+1} \\ y_{i+1} \\ \alpha_{i+1} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} t_i + h \\ \text{if} \left(l1_i + K(t_i, l1_i, l1_{k_i}, \alpha_i, y_i) \geq 0, l1_i + K(t_i, l1_i, l1_{k_i}, \alpha_i, y_i), 0 \right) \\ l1_{k_i} + M(t_i, l1_i, l1_{k_i}, \alpha_i, y_i) \\ \text{if} \left(l2_i + B(t_i, l2_i, l2_{k_i}, \alpha_i, y_i) \geq 0, l2_i + B(t_i, l2_i, l2_{k_i}, \alpha_i, y_i), 0 \right) \\ l2_{k_i} + P(t_i, l2_i, l2_{k_i}, \alpha_i, y_i) \\ y_i + S(t_i, l1_i, l1_{k_i}, l2_i, l2_{k_i}, \alpha_i, y_i) \\ \text{if} \left(\alpha_i + C(t_i, l1_i, l1_{k_i}, l2_i, l2_{k_i}, \alpha_i, y_i) \geq \alpha_0, \alpha_0, \alpha_i + C(t_i, l1_i, l1_{k_i}, l2_i, l2_{k_i}, \alpha_i, y_i) \right) \end{pmatrix}$$

Приложение В

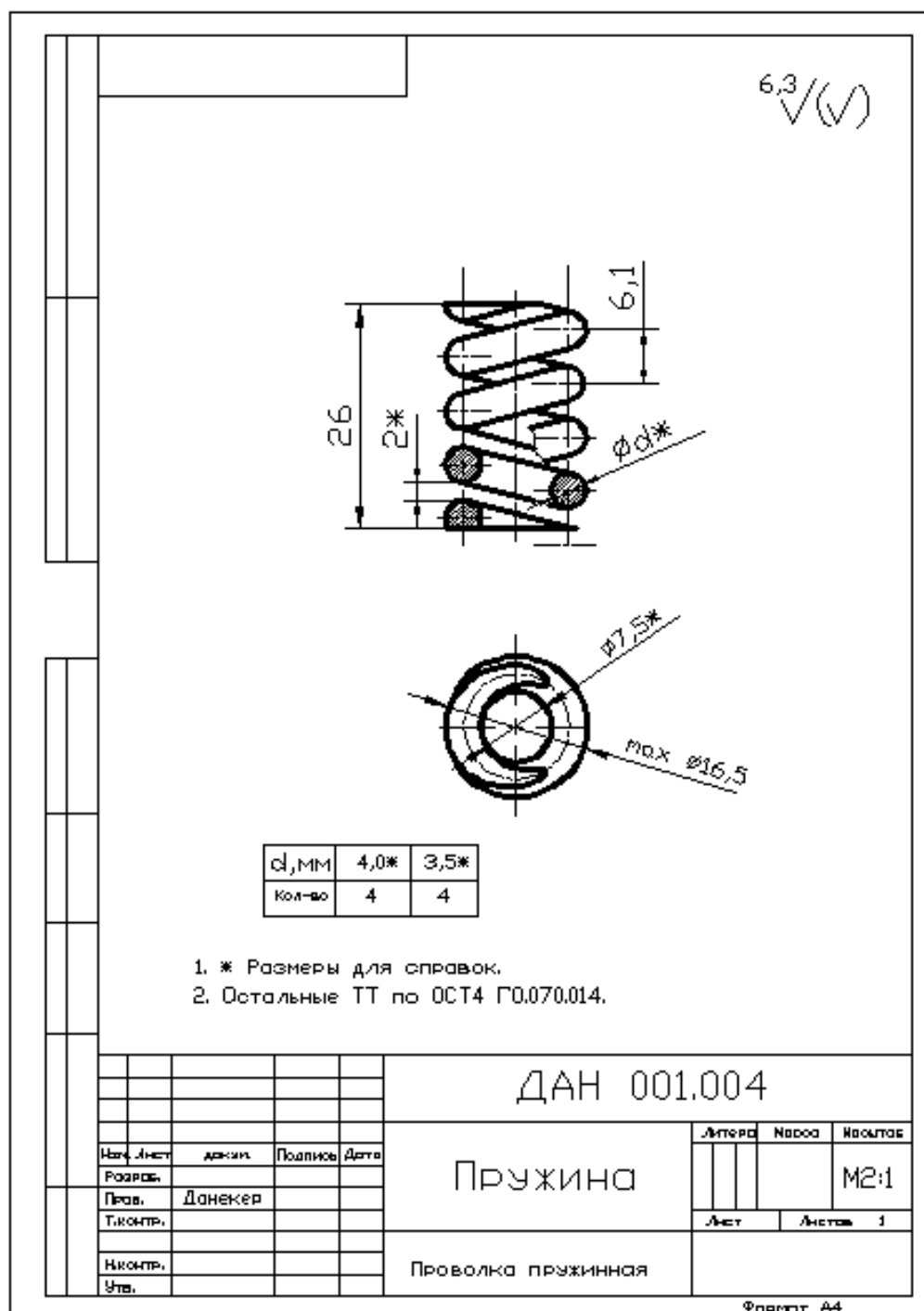
Чертеж активатора



Чертеж магнитопровода



Приложение Д Чертеж пружины



Приложение Е Чертеж рычага

